Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Nosso negócio

Educação para o Trabalho e Cidadania.

Introdução

Quando ligamos a televisão, o rádio ou o computador, estamos utilizando eletricidade. Seria muito difícil imaginar o mundo de hoje sem a eletricidade.

Este fascículo foi elaborado para que o leitor compreenda melhor os fenômenos elétricos e suas aplicações na vida prática. Para isso, é necessário que o leitor entenda de que e como a **matéria** é constituída.

Sendo este o primeiro fascículo da **Série de Eletrônica**, os conhecimentos nele contidos são muito importantes para os estudos que se seguirão.

Matéria

O termo **matéria** é empregado genericamente a qualquer substância existente na natureza independentemente do seu estado (sólido, líquido ou gasoso). A **Fig.1** mostra alguns exemplos.

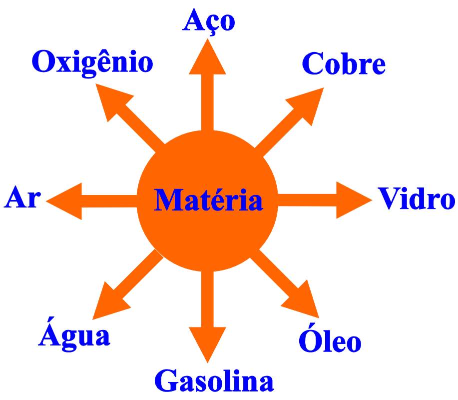


Fig.1 Exemplos de matéria.

A forma como a **matéria** se comporta física, química ou eletricamente na natureza depende da sua estrutura. O conhecimento da estrutura da **matéria**, em muitas ocasiões, é indispensável para a compreensão do comportamento dos componentes nos circuitos elétricos.

ESTRUTURA DA MATÉRIA

Qualquer porção de **matéria** pode ser dividida sucessivamente em partes cada vez menores. Por exemplo, uma grande quantidade de água pode ser dividida em várias porções cada uma com um metro cúbico. Cada metro cúbico de água, por sua vez, pode ser dividido em litros, que também podem ser divididos em copos e daí em gotas etc.

Em qualquer uma destas divisões, a quantidade separada (o metro cúbico, o litro, o copo etc.) continua sendo água, como ilustrado na **Fig.2**.

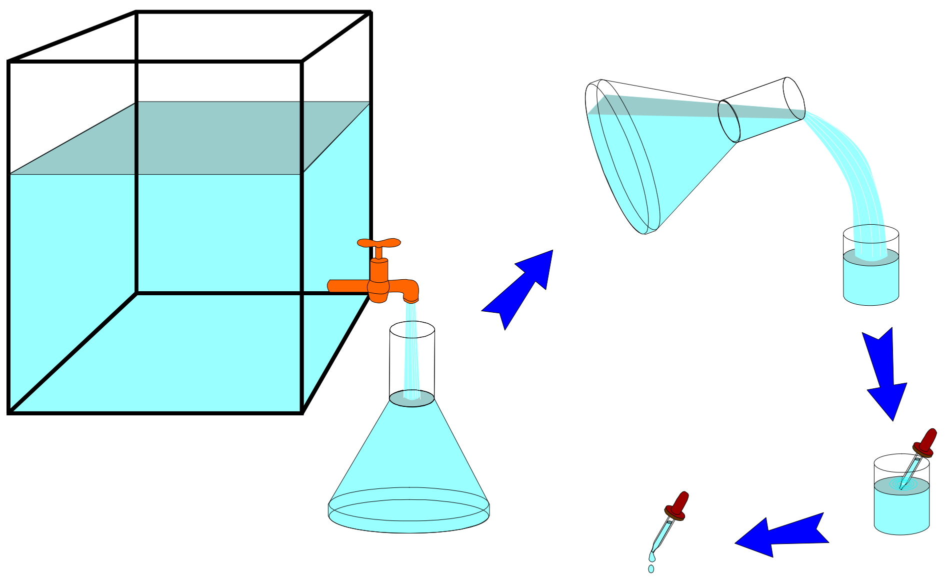


Fig.2 Diferentes quantidades de água.

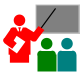
Com o auxílio de equipamentos de laboratório, uma simples gota de água pode ainda ser dividida sucessivamente em muitas outras pequenas partes, que ainda continuarão sendo, cada uma delas, água. Entretanto, se a divisão sucessiva continuar, em um dado momento acontecerá um fenômeno interessante. Ao dividir uma porção infinitamente pequena de água, o resultado da divisão deixará de ser duas porções menores de água. Isso significa que a pequeníssima porção de água que se tinha antes da divisão era a menor porção desta substância que ainda mantinha as características iniciais. Esta pequena porção é denominada de **molécula**.

Molécula é a menor porção de uma substância que ainda conserva as suas propriedades iniciais.

A molécula é infinitamente pequena, tão pequena que sob certas condições em 1 litro de oxigênio, por exemplo, existe algo da ordem de 10^{22} moléculas. Todos os materiais ou substâncias com os quais o homem tem contato são constituídos por um número extremamente grande de moléculas.

CONSTITUIÇÃO DA MOLÉCULA

A divisão de uma molécula dá origem a duas ou mais partes menores que podem ser chamadas de **partículas**. Estas partículas são denominadas de **átomos**.



Átomos são partículas que constituem uma molécula.

Considerando que a molécula é muito pequena, conclui-se portanto que suas partículas constituintes, os átomos, são menores ainda. Para dar uma idéia do tamanho relativo destas pequenas partículas, basta considerar que, se 100 milhões de átomos fossem colocados lado a lado, formariam um segmento de reta de aproximadamente 1cm de comprimento.

Através de pesquisas científicas, verificou-se que existem na natureza 87 tipos distintos de átomos. Além destes 87 tipos, existem ainda outros produzidos artificialmente em laboratório, que são instáveis, ou seja, eles existem apenas durante um curto período de tempo. Os diversos tipos de átomos são agrupados em uma tabela denominada de **Tabela Periódica dos Elementos Químicos**, conforme se pode observar no diagrama ilustrado na **Fig.3**.

I	II											III	IV	V	VI	VI	0
1 H 1.0																	2 He 4
3 Li 6.9	4 Be 9.0											5 B 10.8	6 C 12	7 N 14	8 O 16	9 F 19	10 Ne 20.2
11 Na 23	12 Mg 24.3											13 Al 27	14 Si 28.1	15 P 31	16 S 32.1	17 Cl 35.5	18 Ar 39.9
19 K 39.1	20 Ca 40.1	21 Sc 45	22 Ti 47.9	23 V 50.9	24 Cr 52	25 Mn 54.9	26 Fe 55.9	27 Co 58.9	28 Ni 58.7	29 Cu 63.5	30 Zn 65.4	31 Ga 69.7	32 Ge 72.6	33 As 74.9	34 Se 79	35 Br 79.9	36 Kr 83.8
37 Rb 85.5	38 Sr 87.6	39 Y 88.9	40 Zr 91.2	41 Nb 92.9	42 Mo 95.9	43 Tc (98)	44 Ru 101.1	45 Rh 102.9	46 Pd 106.4	47 Ag 107.9	48 Cd 112.4	49 In 114.8	50 Sn 118.7	51 Sb 121.8	52 Te 127.6	53 I 126.9	54 Xe 131.3
55 Cs 132.9	56 Ba 137	57 # La 138.9	72 Hf 178.5	73 Ta 180.9	74 W 183.9	75 Re 186.2	76 Os 190.2	77 Ir 192.2	78 Pt 195.1	79 Au 197	80 Hg 200.6	81 Tl 204.4	82 Pb 207.2	83 Bi 209	84 Po (210)	85 At (210)	86 Rn (222)
87 Fr (223)	88 Ra 226	89 @ Ac 227	104 Unq (259)	105 Unp (260)	106 Unh (263)	107 Uns (262)	108 108 (265)	109 Une (266)									

58 Ce 140.1	59 Pr 140.9	60 Nd 144.2	61 Pm (145)	62 Sm 150.4	63 Eu 152	64 Gd 157.2	65 Tb 157.9	66 Dy 162.5	67 Ho 164.9	68 Er 167.3	69 Tm 168.9	70 Yb 173.0	71 Lu 175	Lantanídeos
90 Th 232.0	91 Pa 231.0	92 U 238.0	93 Np 237.0	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)	103 Lr (260)	Actinídeos

Fig.3 Tabela periódica dos elementos químicos.

Na tabela periódica, cada elemento químico é representado por um símbolo. A **Tabela 1** mostra alguns exemplos de elementos químicos e os símbolos utilizados para representá-los.

Tabela 1 Alguns exemplos de elementos químicos com os respectivos símbolos.

Elemento	Hidrogênio	Oxigênio	Carbono	Cobre	Silício	Cobalto
Símbolo	H	O	C	Cu	Si	Co

Os átomos unem-se entre si em diferentes arranjos, dando origem às moléculas de todas as substâncias da natureza. Um exemplo bastante importante da união de átomos na formação de uma molécula é a união de dois átomos de hidrogênio (H) com um de oxigênio (O). A molécula formada é a da água, ilustrada na **Fig.4**, cuja fórmula química obtida é a bem conhecida $\mathbf{H_2O}$.

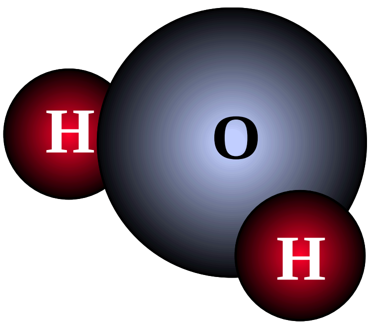


Fig.4 Molécula da água.

Átomos

As partículas que constituem as moléculas foram denominadas pelos gregos de átomos. Eles acreditavam serem estas as menores partículas do universo, não podendo portanto serem divididas. Entretanto, com o desenvolvimento dos métodos de pesquisa científicas verificou-se que os átomos também são constituídos por partículas menores, denominadas de **partículas subatômicas**. Estas partículas subatômicas são os **prótons**, os **elétrons** e os **nêutrons**. Cada uma destas partículas subatômicas tem características próprias. A **Tabela 2** mostra as características elétricas destas três partículas.

Tabela 2 Características elétricas do **próton**, **elétron** e **nêutron**.

Partícula	Propriedade elétrica
Próton	Possui carga elétrica positiva. Adota-se por convenção o valor (+1) para a quantidade de carga do próton.
Elétron	Possui a mesma quantidade de carga do próton, mas um sinal negativo, isto é, a carga do elétron vale (–1) de acordo com a convenção utilizada.
Nêutron	É uma partícula subatômica que não possui carga elétrica.

MASSA DAS PARTÍCULAS SUBATÔMICAS

Como as partículas subatômicas são muito pequenas, suas massas não podem ser determinadas em função das unidades normais de massa (quilograma, grama, miligrama etc.). Por esta razão, convencionou-se uma unidade específica para definir a massa das partículas subatômicas: **a unidade de massa atômica**, abreviadamente **u.m.a**. A massa de cada partícula subatômica está especificada na **Tabela 3.**

Tabela 3 Massa do **próton**, do **elétron** e do **nêutron**.

Partícula	Massa
Próton	Possui uma massa correspondente a 1 u.m.a.
Elétron	Possui uma massa equivalente à fração 1/1836 da massa do próton
Nêutron	Possui uma massa correspondente a 1 u.m.a.

A ESTRUTURA DO ÁTOMO

A forma como as partículas subatômicas estão organizadas em um átomo, em muito se assemelha à configuração do sistema solar do qual a Terra faz parte, como mostrado na **Fig.5**.

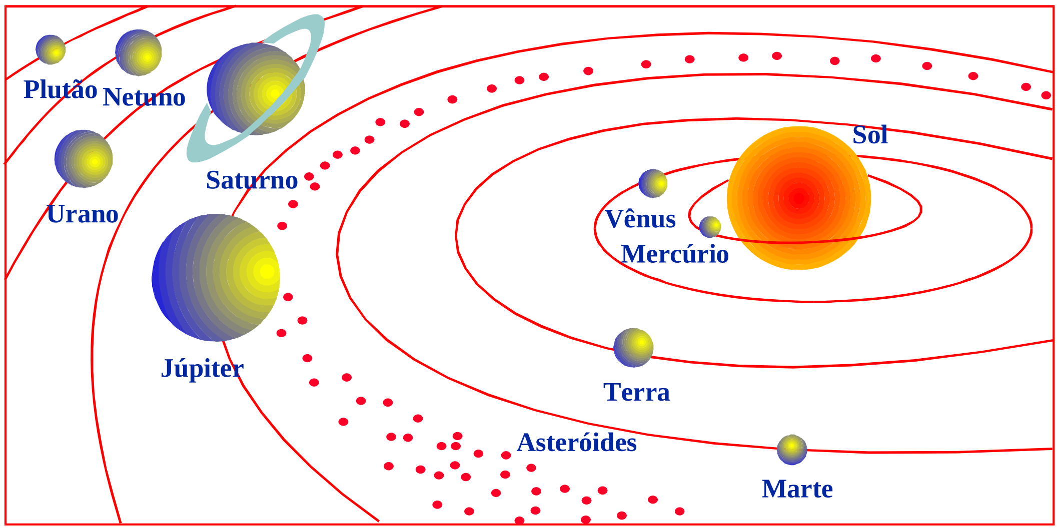


Fig.5 O Sistema solar.

O sistema solar é composto pelo Sol, que ocupa a região central ou núcleo do sistema, e dos planetas que giram ao seu redor em trajetórias que formam órbitas fechadas, como se pode ver na **Fig.6**.

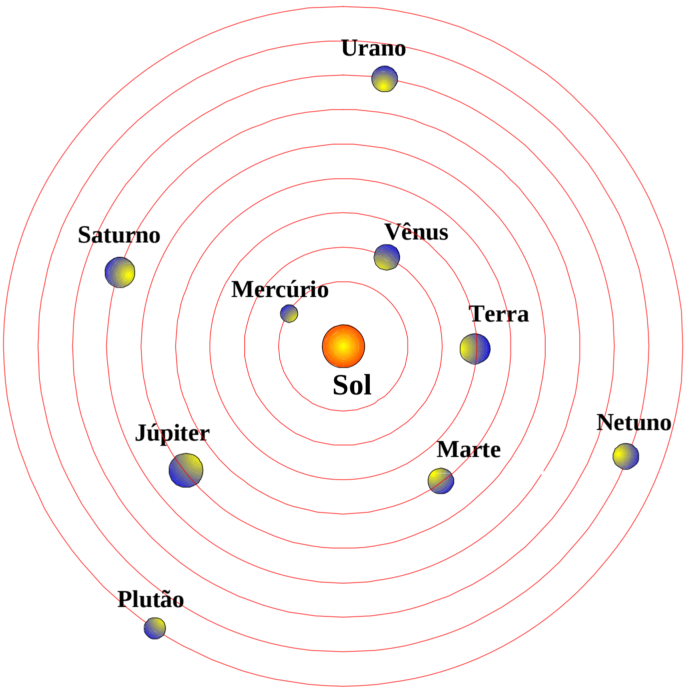


Fig.6 O sistema solar.

Como se pode observar na **Fig.7**, no átomo os **prótons** e **nêutrons** se reúnem na região central formando o núcleo.

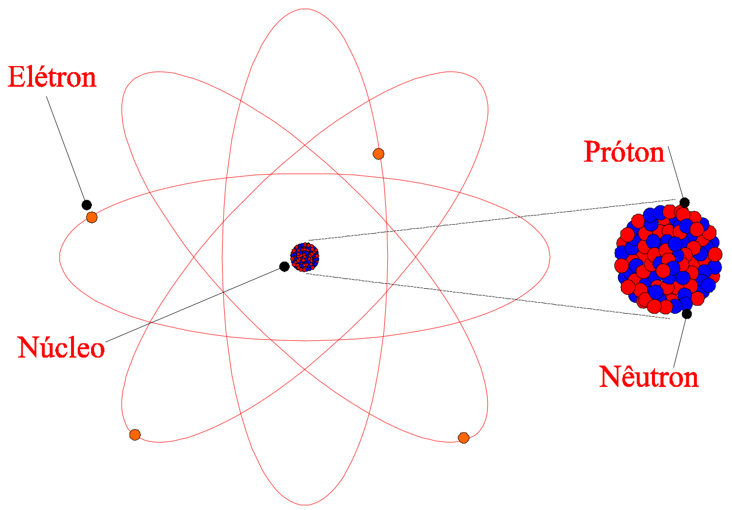


Fig.7 O núcleo do átomo.

Núcleo é a região central do átomo, sendo formado pelo agrupamento de prótons e nêutrons.

Os **elétrons**, assim como os planetas do sistema solar, giram ao redor do núcleo, descrevendo trajetórias denominadas de órbitas.

A região do espaço ao redor do núcleo onde os **elétrons** se movimentam é denominada de eletrosfera.

Eletrosfera é a região do espaço ao redor do núcleo onde os elétrons se movimentam.

Observando o átomo, verifica-se que as partículas de maiores massas, o **próton** e o **nêutron**, localizam-se no núcleo. Por esta razão, pode-se dizer que praticamente toda a massa de um átomo está concentrada no seu núcleo. Os **elétrons** que orbitam ao redor do núcleo do átomo estão distribuídos em camadas ou níveis energéticos.

De acordo com o número de **elétrons**, a eletrosfera pode apresentar de 1 a 7 níveis energéticos, denominados de nível K, L, M, N, O, P e Q.

A **Fig.8** mostra os átomos de alguns elementos químicos com as respectivas distribuições de **elétrons** nas camadas.

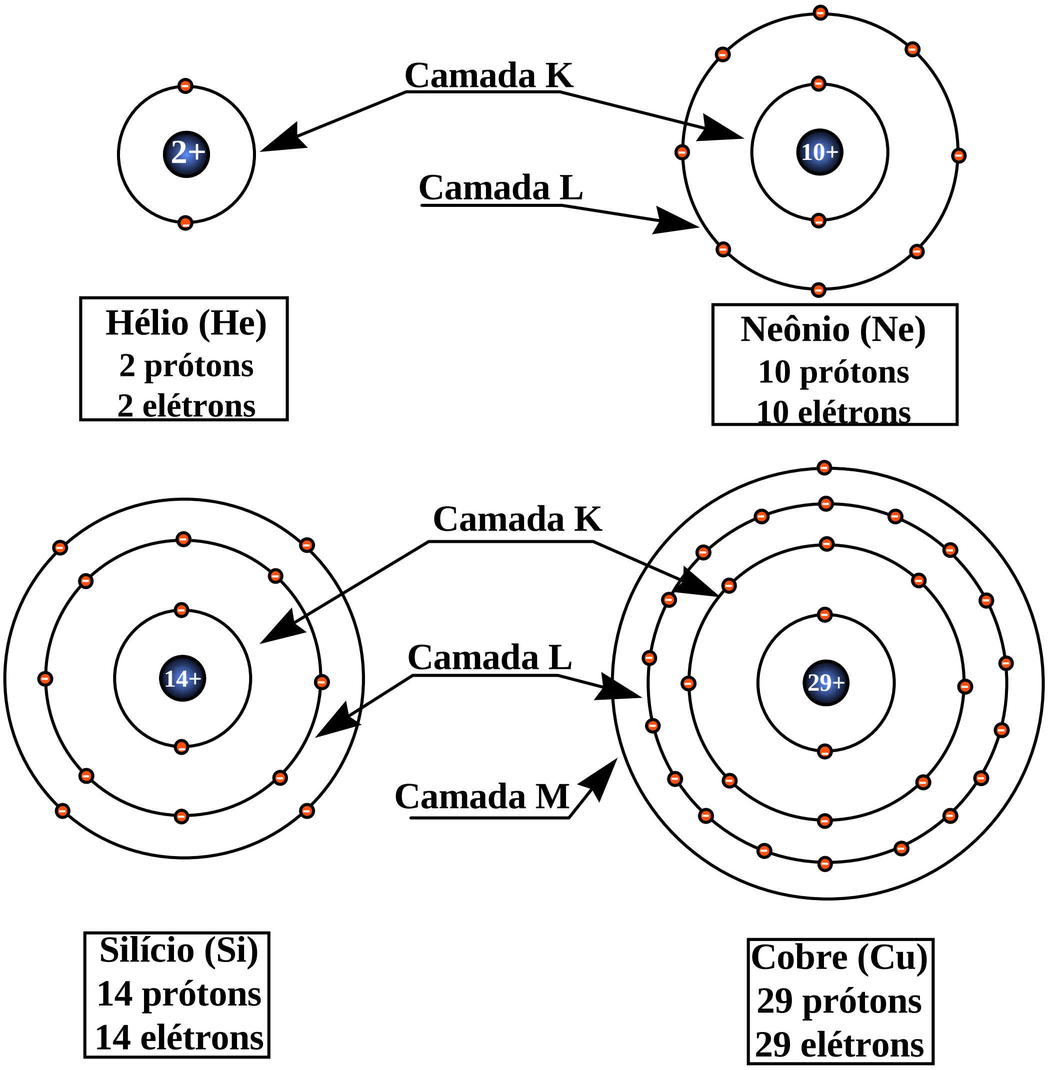


Fig.8 Átomos de Hélio (He), Neônio (Ne), Silício (Si) e Cobre (Cu).

A distribuição dos **elétrons** nos diversos níveis obedece a condições bem definidas. A regra mais importante referente à estrutura atômica e de importância na compreensão dos fenômenos da eletricidade e da eletrônica, é a que diz respeito ao nível energético mais distante do núcleo ou camada externa. Esta regra diz que a camada energética mais externa de um átomo pode acomodar no máximo 8 elétrons.

Todas as reações químicas e elétricas, com exceção das reações nucleares, se processam na camada mais externa do átomo, denominada de camada ou nível de valência, conforme ilustrado na **Fig.9**.

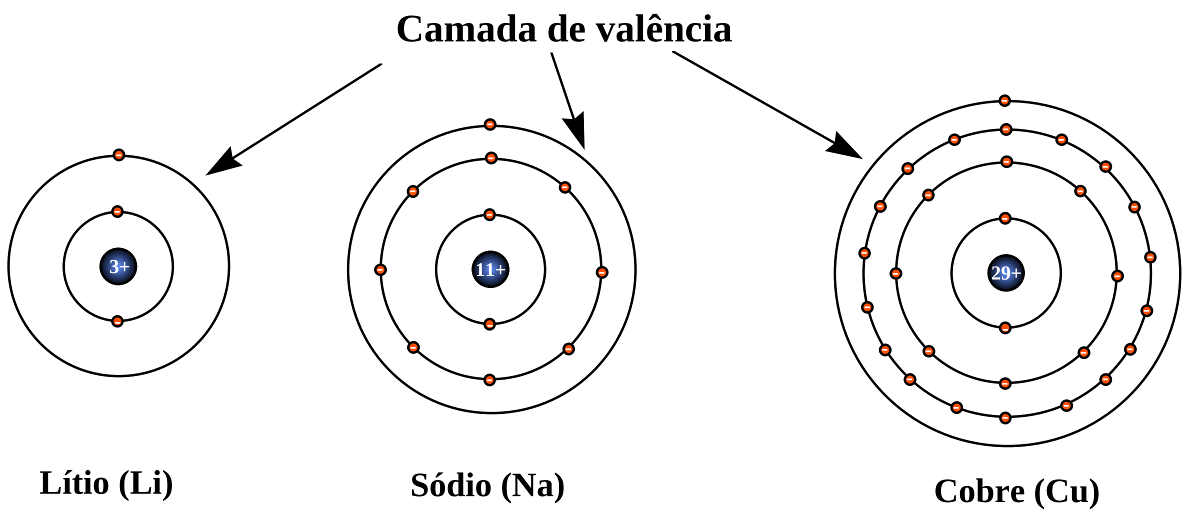


Fig.9 Camada de valência de alguns átomos.

A camada externa da eletrosfera onde se realizam as reações químicas e elétricas se denomina de camada de valência.

EQUILÍBRIO ELÉTRICO DE UM ÁTOMO

Das três partículas subatômicas, apenas o **próton** e o **elétron** possuem carga elétrica. Em condições normais, os átomos tendem a assumir uma condição de neutralidade ou equilíbrio elétrico, de forma que o número total de **prótons** no núcleo é igual ao número de **elétrons** na eletrosfera. Quando esta condição ocorre, o átomo está **eletricamente neutro** ou equilibrado.

Um átomo está em equilíbrio elétrico quando o número de elétrons na eletrosfera é igual ao número de prótons no núcleo. Os nêutrons no núcleo, sendo eletricamente neutros, não interferem no equilíbrio elétrico do átomo.

A **Tabela 4** apresenta alguns exemplos de átomos eletricamente equilibrados.

Tabela 4 Exemplos de átomos eletricamente equilibrados.

Elemento	Símbolo	Número de prótons	Número de elétrons	Carga total do átomo
Hidrogênio	H	1	1	+1 – 1 = 0
Ferro	Fe	26	26	+26 – 26 = 0
Cobre	Cu	29	29	+29 – 29 = 0
Alumínio	Al	13	13	+13 – 13 = 0

Através de forças externas de origem magnética, térmica ou química, é possível retirar ou acrescentar **elétrons** na camada de valência de um átomo, fazendo com que haja um desequilíbrio elétrico. Quando, por um processo qualquer, um **elétron** é retirado da camada de valência, o átomo passa a estar carregado positivamente (um **elétron** a menos). Este átomo, ilustrado na **Fig.10**, passa a chamar-se de **íon positivo**.

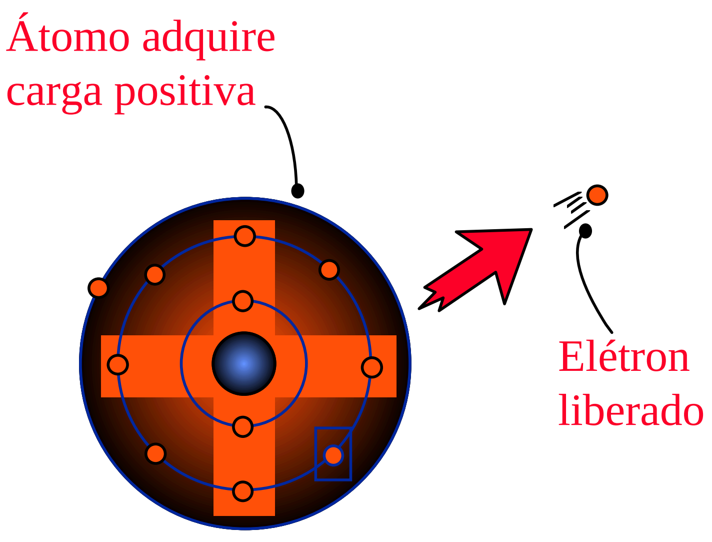


Fig.10 Átomo com carga positiva.

Íon positivo é um átomo com uma deficiência de um ou mais elétrons, tornando-se eletricamente positivo.

Da mesma forma, quando um **elétron** é colocado por um processo qualquer na última camada de um átomo, este átomo carregado negativamente é então chamado de **íon negativo**. A **Fig.11** mostra um átomo com carga negativa.

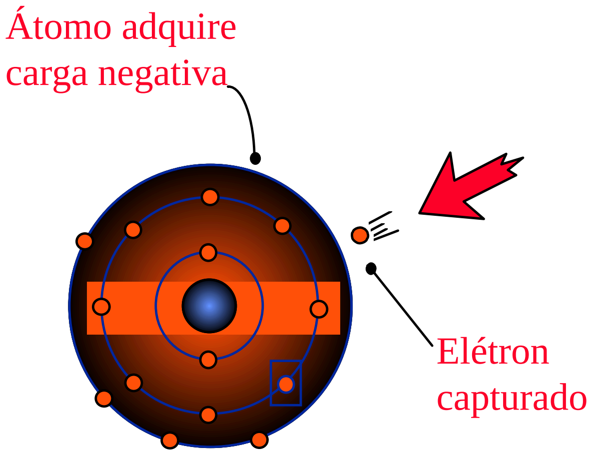


Fig.11 Átomo com carga negativa.

Íon negativo é um átomo com um excesso de um ou mais elétrons, tornando-se eletricamente negativo.

Qualquer átomo que esteja desequilibrado eletricamente é um íon. A transformação de um átomo em um íon é sempre causada por processos externos ao átomo. Uma vez terminado o processo causador do desequilíbrio elétrico, há uma tendência natural do átomo em atingir o equilíbrio elétrico, cedendo ou recuperando os **elétrons** necessários a sua neutralidade elétrica.

Os átomos sempre procuram atingir a estrutura estável eletricamente neutra.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. O que são moléculas e de que são constituídas?
2. De que é formado o núcleo do átomo?
3. Que nome se dá à região do espaço ao redor do núcleo onde os elétrons se movimentam?

BIBLIOGRAFIA

SCHUSTER, KARL. **Constituição da Matéria**: EP 01 [Aufbau der Materie] Traduzido e adaptado pelo Setor de Divulgação Tecnológica, Siemens. 2.ª ed. São Paulo, Siemens/Edgard Blücher, 1977, 62p.

VAN VALKENBURG, NOOGER & NEVILLE. **Eletricidade Básica**, 15.ª ed., São Paulo, Freitas Bastos, vol. 1, 1970.

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

A busca constantes da qualidade e a preocupação com o atendimento ao cliente estão presentes nas ações do *SENAI*.

Introdução

A tensão, tal como a corrente e a resistência elétrica, é uma grandeza de fundamental importância no estudo da eletricidade e da eletrônica.

Neste fascículo, o leitor aprenderá como uma tensão elétrica pode ser produzida, qual a sua unidade, quais são as suas fontes mais comuns e como esta grandeza pode ser medida.

Para ter sucesso no desenvolvimento do conteúdo e atividades deste fascículo, o leitor já deverá ter conhecimentos relativos a:

- Estrutura da matéria.

Tensão elétrica

Como se sabe, é necessária a existência de uma **tensão elétrica** para que seja possível o funcionamento de qualquer equipamento elétrico (lâmpadas, televisores, motores, computadores etc.). Nas próximas seções veremos que a tensão elétrica é uma grandeza que pode ser medida, e que tem origem no desequilíbrio elétrico dos corpos.

Tensão elétrica é uma grandeza que pode ser medida e que tem origem no desequilíbrio elétrico dos corpos.

ELETRIZAÇÃO DE UM CORPO

No estado natural, qualquer porção de matéria é eletricamente neutra. Isto significa que, se nenhum agente externo atuar sobre uma determinada porção de matéria, o número total de **prótons** e **elétrons** dos seus átomos será igual. A **Fig.1** mostra alguns corpos no estado natural e portanto eletricamente neutros.

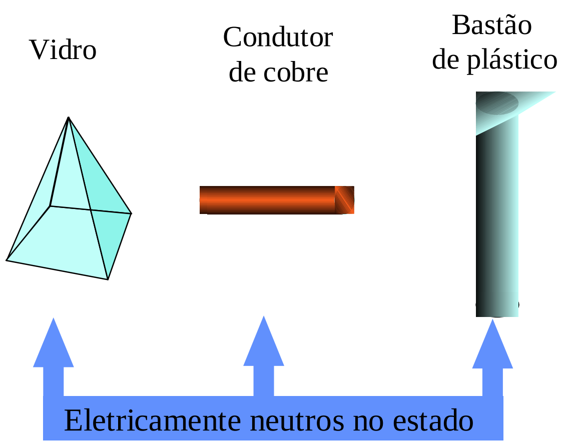


Fig.1 Exemplos de corpos neutros.

Esta condição de equilíbrio elétrico natural da **matéria** pode ser desfeita, de forma que um corpo deixe de ser neutro e fique carregado eletricamente. O processo através do qual se faz com que um corpo eletricamente neutro fique carregado é denominado de eletrização.

Eletrização é um processo que permite fazer com que um corpo neutro fique eletricamente carregado.

O tipo de carga elétrica (positiva ou negativa) que um corpo assume após sofrer um processo de eletrização depende do tipo do corpo e do processo utilizado. Os processos de eletrização atuam sempre nos **elétrons** que estão na última camada dos átomos (camada de valência). Quando um processo de eletrização retira **elétrons** da camada de valência dos átomos o material fica com o número de **prótons** maior que o número de **elétrons**. Nestas condições, o corpo fica eletricamente positivo, conforme ilustrado na **Fig.2**.

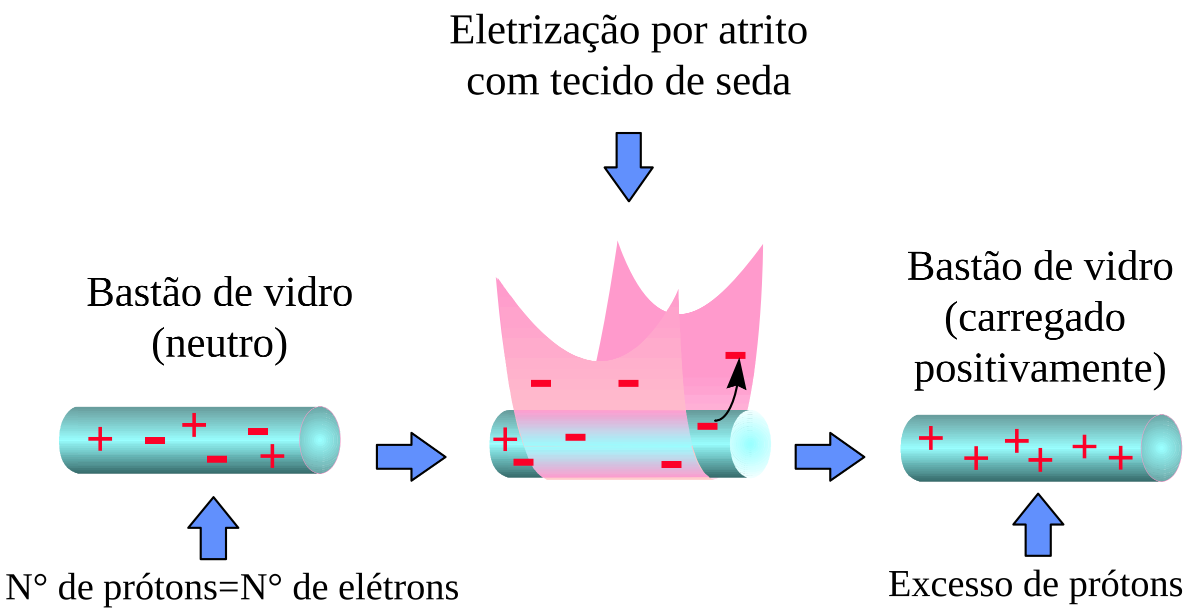


Fig.2 Eletrização por atrito produzindo um corpo carregado positivamente.

Na eletrização por retirada de elétrons, o corpo fica carregado positivamente.

Quando um processo de eletrização acrescenta **elétrons** a um material, o número de **elétrons** torna-se maior que o número de **prótons.** Nestas condições, o corpo fica eletricamente negativo, como mostrado na **Fig.3**.

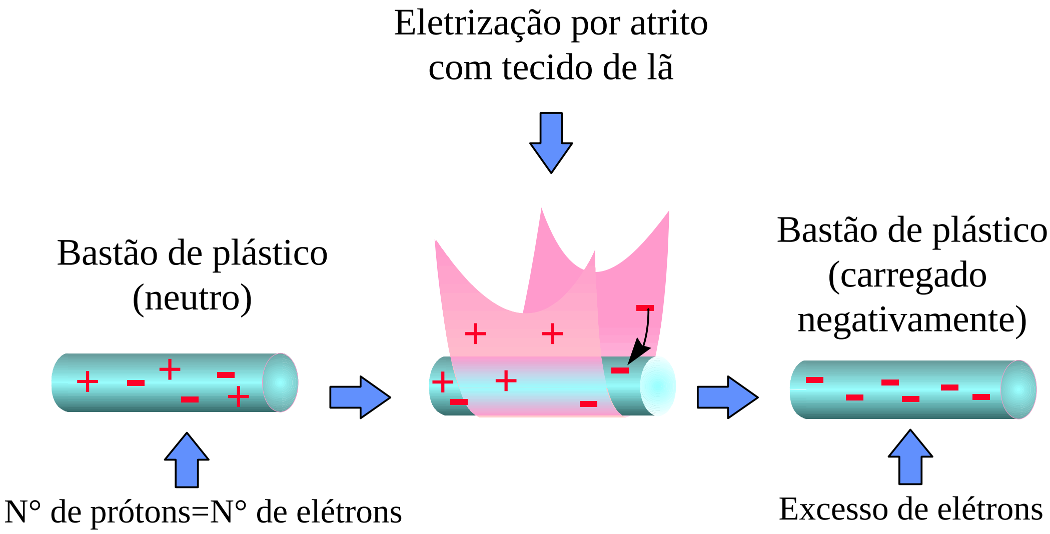


Fig.3 Eletrização por atrito produzindo um corpo carregado negativamente.

Na eletrização por acréscimo de elétrons, o corpo fica carregado negativamente.

ELETRIZAÇÃO POR ATRITO

Existem vários processos de eletrização, dentre os quais o mais comum é o por atrito. A eletrização por este processo é muito comum na natureza. Por exemplo, quando se usa um pente, o atrito com os cabelos provoca uma eletrização do pente (retiram-se **elétrons** do pente), conforme mostrado na **Fig.4**.

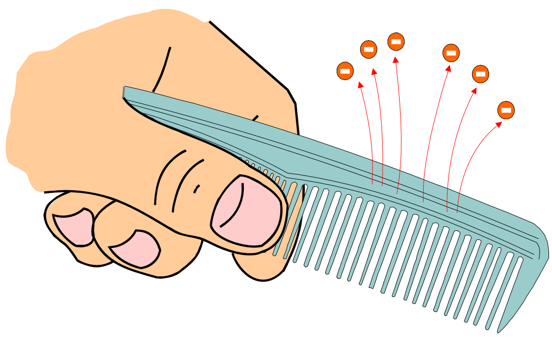


Fig.4 Eletrização do pente por atrito.

Aproximando-se o pente (eletrizado positivamente) de pequenos pedaços de papel, estes são atraídos momentaneamente pelo pente, comprovando a existência da eletrização, conforme ilustrado na **Fig.5**.

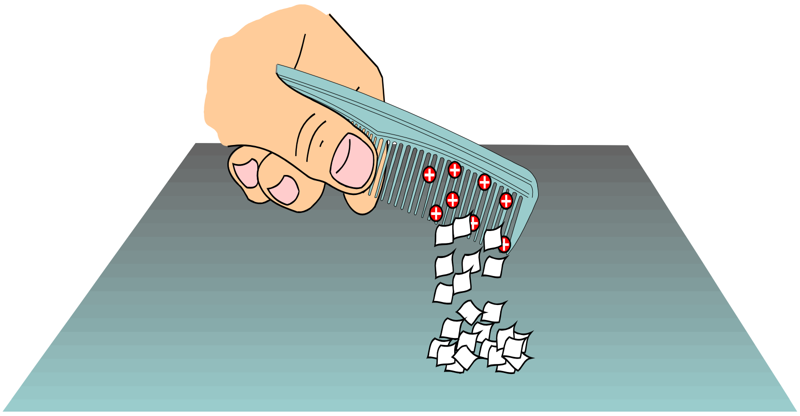


Fig.5 Atração de pequenos pedaços de papel por um pente eletrizado.

Outro exemplo muito comum na natureza de eletrização por atrito ocorre nas tempestades. As nuvens são atritadas contra o ar adquirindo com isso uma carga elétrica muito grande. O relâmpago, que é um fenômeno elétrico, comprova a existência de grandes cargas elétricas nas nuvens.

Existem ainda outros processos de eletrização, tais como: eletrização por indução, eletrização por contato, eletrização por impacto etc. Em qualquer processo, contudo, o resultado são corpos carregados eletricamente. A carga elétrica de um corpo obtida por eletrização denomina-se eletricidade estática.

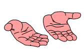
ATRAÇÃO E REPULSÃO ENTRE CARGAS ELÉTRICAS

Quando dois corpos eletrizados são aproximados um do outro, nota-se que existe uma reação entre eles. Através da realização de experiências, verifica-se que se um dos corpos está carregado positivamente e o outro negativamente, existe uma tendência de os dois corpos se atraírem mutuamente. No entanto, se os dois corpos apresentam cargas de mesmo sinal, eles se repelem.

A partir destas observações, concluiu-se que:



Cargas de sinais opostos se atraem.



Cargas de mesmo sinais se repelem.

A **Fig.6** ilustra a interação entre dois corpos eletrizados.

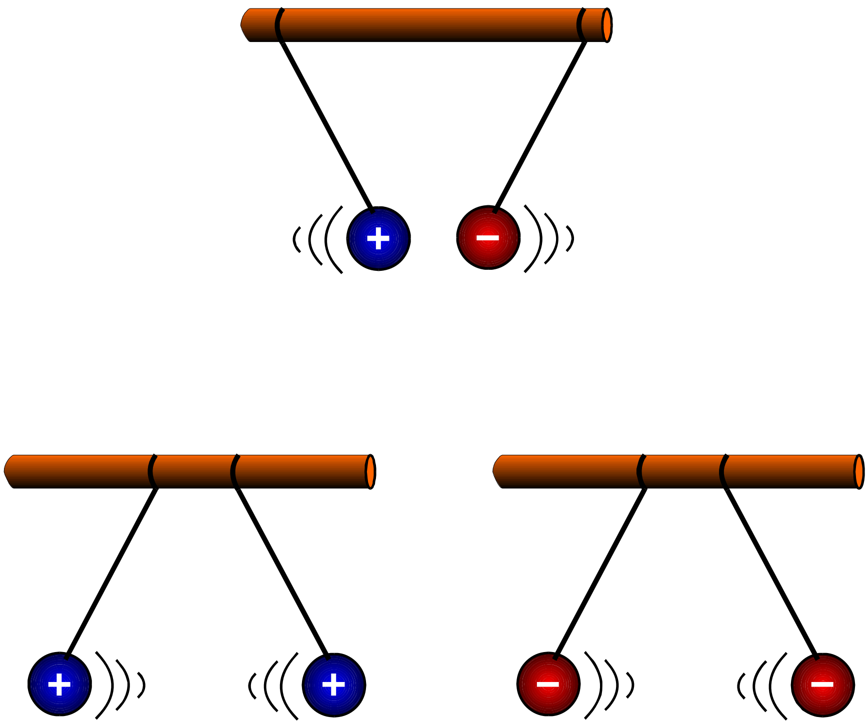


Fig.6 Interação entre corpos eletrizados.

POTENCIAL ELÉTRICO

Tomando-se um pente que não tenha sofrido nenhum atrito, ou seja, sem eletricidade estática, e aproximando-o de pequenas partículas de papel, não ocorre nenhum fenômeno de interação elétrica, conforme ilustrado na **Fig.7**.



Fig.7 Pente sem ter sofrido atrito e na presença de pequenos pedaços de papel.

Entretanto, se o pente for eletrizado, ao aproximá-lo das partículas de papel estas serão atraídas por ele. Isto significa que o pente carregado tem capacidade de realizar o trabalho de movimentar o papel, como pode ser visto na **Fig.8**.

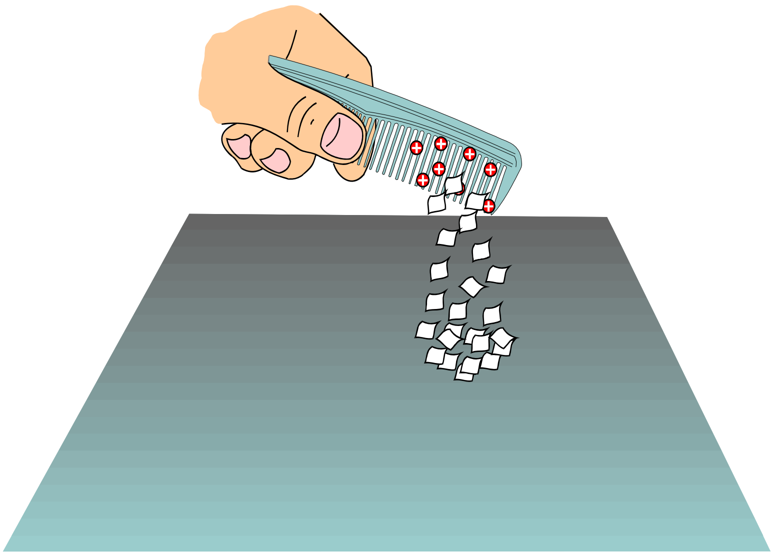


Fig.8 Efeito da atração eletrostática entre um pente eletrizado e pequenos pedaços de papel.

Quando um corpo adquire capacidade de realizar um trabalho, diz-se que este corpo tem **potencial**. Como no caso do pente, a capacidade de realizar o trabalho se deve a um desequilíbrio elétrico. Assim, seu potencial é denominado de **potencial elétrico**. Qualquer corpo eletrizado tem capacidade de realizar um trabalho.

Todo corpo eletrizado apresenta um potencial elétrico.

A afirmação também é válida para corpos eletrizados negativamente. Os corpos eletrizados **positivamente** têm **potencial elétrico positivo** e os **corpos eletrizados negativamente** têm **potencial elétrico negativo**, conforme ilustrado na **Fig.9**.

Potencial elétrico positivo

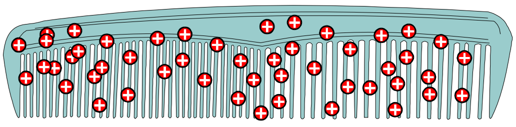


Potencial elétrico negativo

Fig.9 Corpos com potenciais elétricos positivos e negativos.

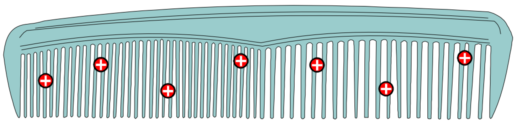
Relação entre desequilíbrio e potencial elétrico

Através dos processos de eletrização, é possível fazer com que os corpos fiquem intensamente ou fracamente eletrizados. Um pente fortemente atritado fica intensamente eletrizado, enquanto que se for fracamente atritado, sua eletrização será fraca, conforme ilustrado nas **Figs.10** e **11**.



Intensa eletrização

Fig.10 Pente fortemente atritado.



Fraca eletrização

Fig.11 Pente fracamente atritado.

O pente intensamente atritado tem maior capacidade de realizar trabalho porque é capaz de atrair maior quantidade de partículas de papel, como mostrado nas **Figs.12** e **13**.

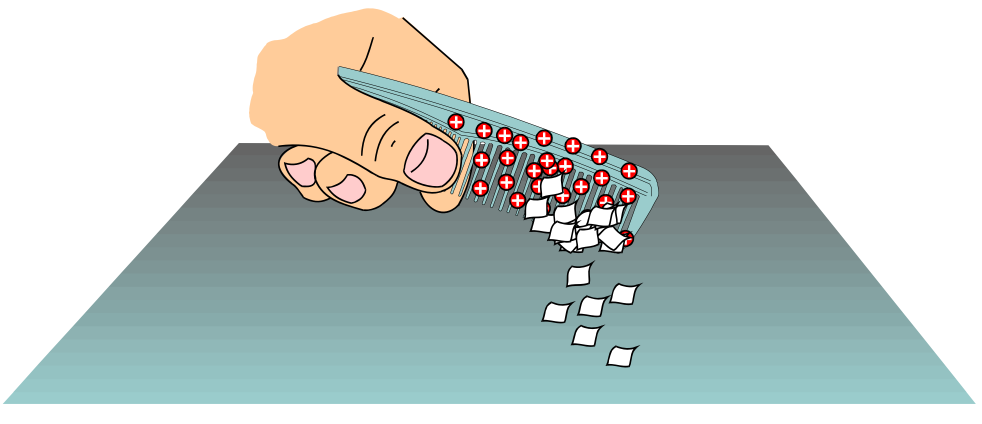


Fig.12 Pente fortemente atritado atrai mais papel.

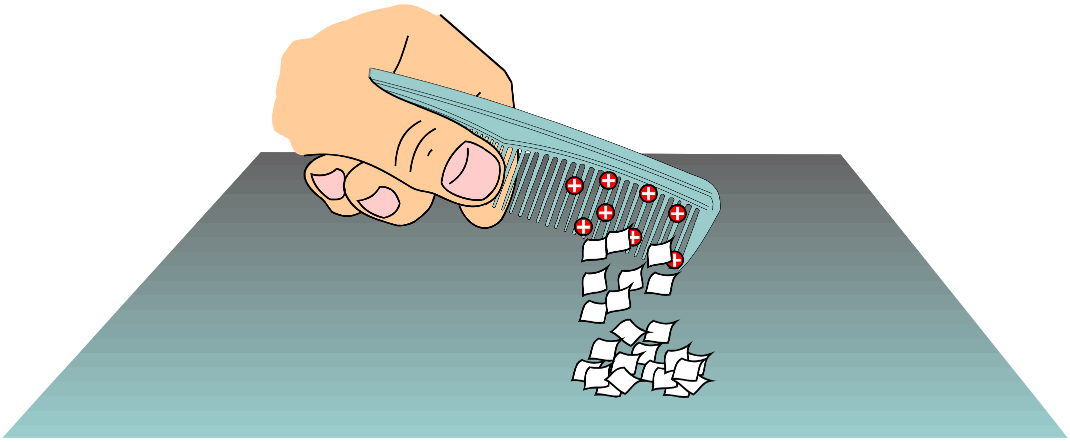


Fig.13 Pente fracamente atritado atrai menos papel.

Como a maior capacidade de realizar trabalho significa maior potencial, conclui-se que o pente intensamente eletrizado tem maior potencial elétrico, como ilustra as **Figs.14** e **15**.

POTENCIAL ELÉTRICO MAIOR

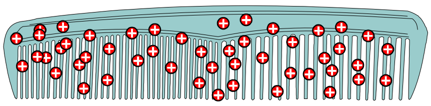


Fig.14 Pente com maior potencial.

POTENCIAL ELÉTRICO MENOR

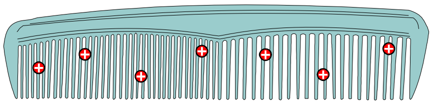


Fig.15 Pente com menor potencial.

O potencial elétrico de um corpo depende diretamente do desequilíbrio elétrico existente neste corpo.

Um maior desequilíbrio elétrico implica num maior potencial elétrico.

Um corpo que tenha um desequilíbrio elétrico duas vezes maior que outro, tem potencial elétrico duas vezes maior.

Quando se comparam os trabalhos realizados por dois corpos eletrizados, automaticamente está-se comparando os seus potenciais elétricos.

A diferença entre os trabalhos expressa diretamente a diferença de potencial elétrico entre os dois corpos.

A diferença de potencial, abreviada por **ddp** é importantíssima nos estudos relacionados com eletricidade e eletrônica. A palavra **diferença** implica sempre em comparação de um valor com outro. Assim, pode-se verificar a existência de diferença de potencial entre corpos eletrizados com cargas diferentes ou com o mesmo tipo de carga, conforme ilustrado na **Fig.16**.

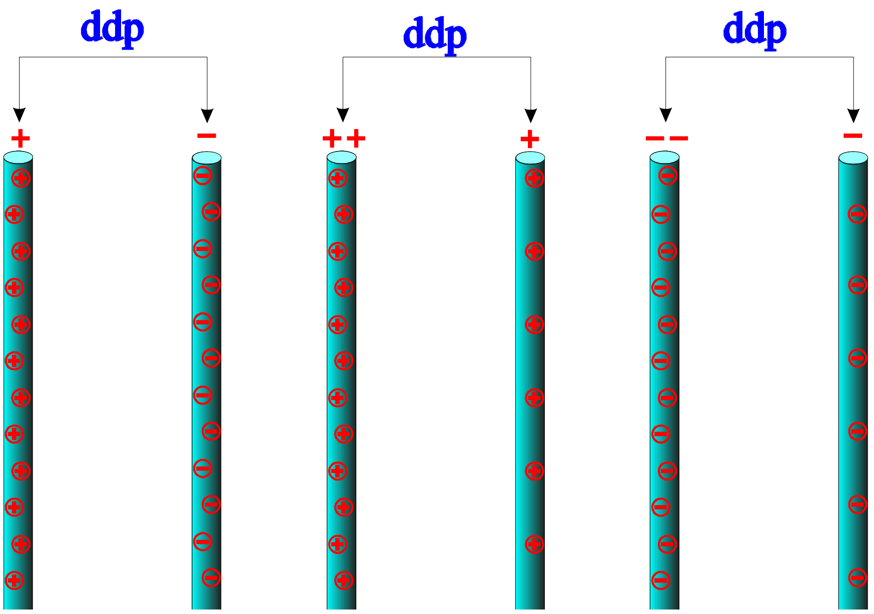


Fig.16 Diferença de potencial entre corpos eletrizados.

A diferença de potencial é também denominada de **tensão elétrica**.

No campo da eletrônica e da eletricidade, utiliza-se quase exclusivamente a expressão tensão ou tensão elétrica para indicar a ddp.

UNIDADE DE MEDIDA DE TENSÃO

A tensão entre dois pontos pode ser medida através de instrumentos. A unidade de medida de tensão é o Volt e o símbolo desta grandeza elétrica é V.

O Volt é a unidade de medida de tensão.

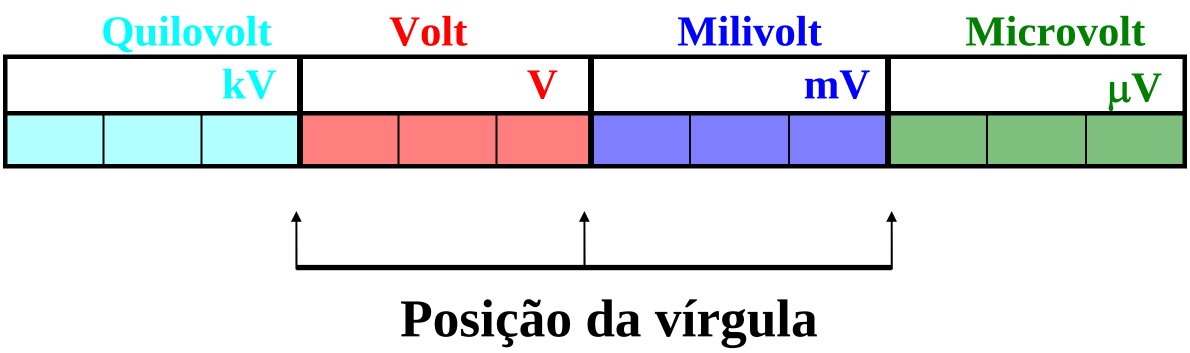
Em algumas situações, a unidade de medida padrão se torna inconveniente. Por exemplo, o metro, que é uma unidade de medida de comprimento, não é adequada para expressar o comprimento de um pequeno objeto, como por exemplo, o diâmentro de um botão, utilizando-se por isso submúltiplos do metro, como o centímetro (0,01m) ou milímetro (0,001m). A unidade de medida de tensão (Volt) também tem múltiplos e submúltiplos adequados a cada situação. A **Tabela 1** mostra alguns deles.

Tabela 1 Múltiplos e submúltiplos do Volt.

Denominação		**Símbolo**	**Valor com relação ao Volt**
Múltiplos	Megavolt	MV	10^6 V ou 1.000.000V
	Quilovolt	KV	10^3 V ou 1.000V
Unidade	Volt	V	–
Submúltiplos	Milivolt	MV	10^{-3} V ou 0,001V
	Microvolt	μV	10^{-6} V ou 0,000001V

No campo da eletricidade, usam-se normalmente o volt e o quilovolt. Na área da eletrônica, contudo, usa-se normalmente o volt, o milivolt e o microvolt.

A conversão de valores é feita de forma semelhante à de outras unidades de medida.



Apresentam-se a seguir alguns exemplos de conversão.

1) 3,75V é o mesmo que 3750 mV. Veja porque:

		kV			V			mV			µV
					3	7	5				

		kV			V			mV			µV
					3	7	5	0			

2) 0,05V é o mesmo que 50mV. Veja porque:

		kV			V			mV			µV
					0	0	5				

		kV			V			mV			µV
					0	0	5	0			

3) 200mV é o mesmo que 0,2V. Veja porque:

		kV			V			mV			µV
						2	0	0			

		kV			V			mV			µV
					0	2	0	0			

4) 15mV é o mesmo que 15000µV. Veja porque:

		kV			V			mV			µV
							1	5			

		kV			V			mV			µV
							1	5	0	0	0

FONTES GERADORAS DE TENSÃO

A existência de tensão é condição fundamental para o funcionamento de todos os aparelhos elétricos. A partir desta necessidade, foram desenvolvidos dispositivos que têm a capacidade de criar um desequilíbrio elétrico entre dois pontos dando origem a uma tensão elétrica. Estes dispositivos são denominados genericamente de **fontes geradoras de tensão**.

Existem vários tipos de fontes geradoras de tensão. As **Figs.17**, **18** e **19** mostram algumas delas.



Fig.17 Pilhas.

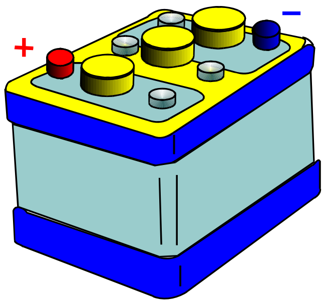


Fig.18 Baterias.

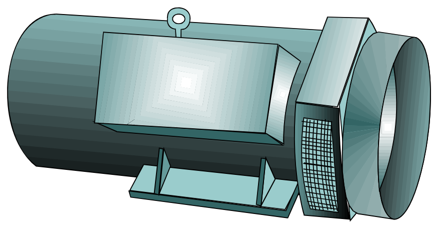


Fig.19 Geradores.

PILHAS

As pilhas são fontes geradoras de tensão usadas, por exemplo, em diversos aparelhos portáteis. Elas são constituídas basicamente por dois tipos de metais mergulhados em um preparado químico, conforme ilustrado na **Fig.20**.

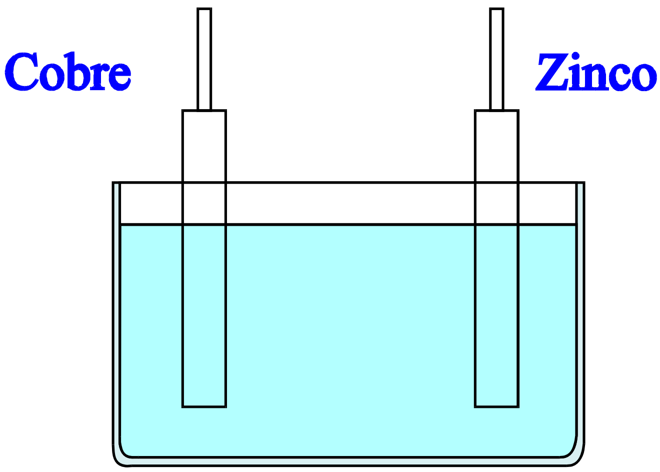


Fig.20 Constituição básica de uma pilha.

Este preparado químico reage com os metais retirando **elétrons** de um e levando para o outro. Um dos metais fica com potencial elétrico positivo e o outro fica com potencial elétrico negativo. A **Fig.21** ilustra a eletrização dos metais.

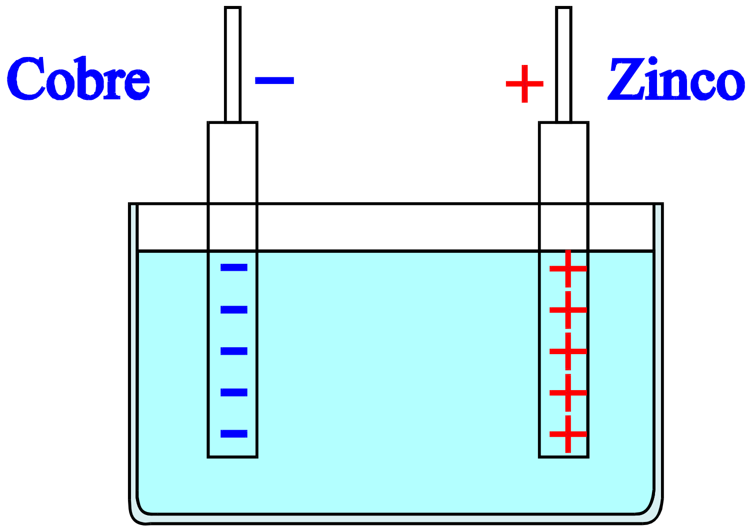


Fig.21 Processo de eletrização dos metais.

Entre os dois metais existe, portanto, uma **ddp** ou **tensão elétrica**, conforme mostrado na **Fig.22**.

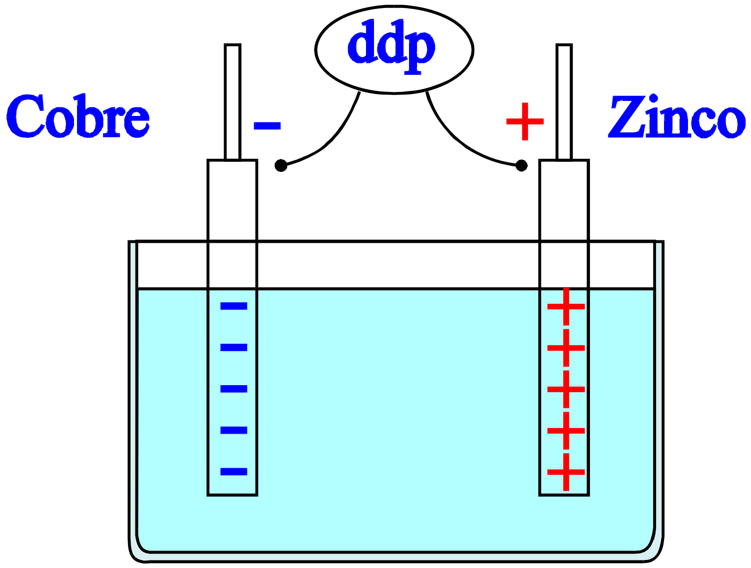


Fig.22 Diferença de potencial entre os dois metais de uma pilha.

Pela própria característica de funcionamento das pilhas, um dos metais torna-se positivo e o outro negativo. Cada um dos metais é denominado de pólo. As pilhas dispõem de um pólo **positivo** e um pólo **negativo**. A **Fig.23** mostra o aspecto real de duas pilhas (pilha pequena e pilha de telefone), indicando os seus pólos.

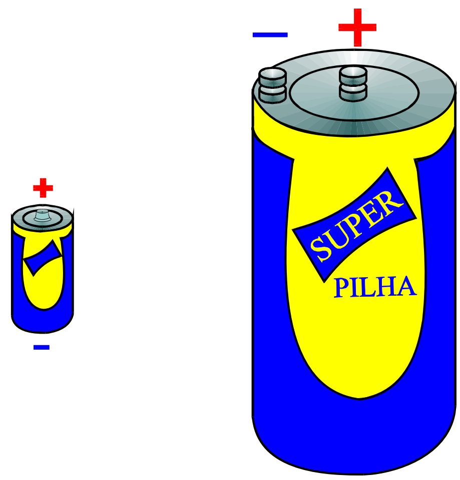


Fig.23 Exemplos de pilhas com a indicação de seus pólos.

Os pólos de uma pilha nunca se alteram. O pólo **positivo** sempre tem potencial **positivo** e o pólo **negativo** sempre tem potencial negativo. Normalmente se diz que as polaridades de uma pilha são fixas.

Devido ao fato de as pilhas terem polaridade invariável, a tensão fornecida é denominada de **tensão contínua, tensão CC (corrente contínua) ou ainda tensão DC (do inglês direct current)**.

Tensão contínua é a tensão elétrica entre dois pontos cuja polaridade é invariável.

Todas as fontes geradoras de tensão que têm polaridade fixa são denominadas de fontes geradoras de tensão contínua.

Fontes geradoras de tensão contínua têm polaridade fixa.

TENSÃO FORNECIDA POR UMA PILHA

As pilhas utilizadas em gravadores, rádios e outros aparelhos fornecem uma tensão contínua de aproximadamente 1,5V, independente do seu tamanho físico, como ilustrado na **Fig.24**.

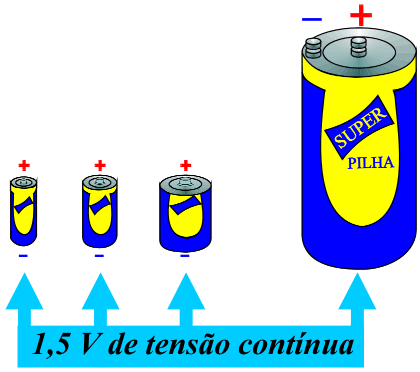


Fig.24 Pilhas de 1,5V de diversos tamanhos.

A tensão fornecida por uma pilha comum é independente do seu tamanho.

GRÁFICO TENSÃO CC VERSUS TEMPO

A tensão fornecida pelas pilhas e geradores de tensão contínua pode ser representada em um gráfico. A **Fig.25** mostra uma representação do comportamento da tensão fornecida por uma pilha ao longo do tempo.

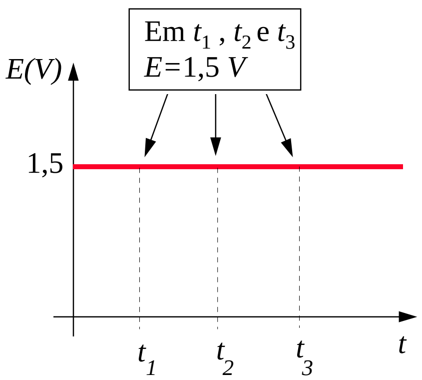


Fig.25 Gráfico tensão versus tempo.

O gráfico da **Fig.25** mostra que a tensão fornecida por uma pilha comum é 1,5V em qualquer instante de tempo.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. O que se entende por tensão elétrica e qual a sua unidade ?
2. O que se entende por eletrização ?
3. O que é uma tensão contínua ?

BIBLIOGRAFIA

LANG, JOHANNES G. **Corrente, tensão, resistência**: EP 02 [Strom, - Spannung - Widerstand] Traduzido e adaptado pelo Setor de Divulgação Tecnológica, Siemens. 2.ª ed. São Paulo, Siemens/Edgard Blücher, 1977, 73pp.

SCHUSTER, KARL. **Constituição da Matéria**: EP 01 [Aufbau der Materie] Traduzido e adaptado pelo Setor de Divulgação Tecnológica, Siemens. 2.ª ed. São Paulo, Siemens/Edgard Blücher, 1977, 62pp.

VAN VALKENBURG, NOOGER & NEVILLE. **Eletricidade Básica**, 15.ª ed., São Paulo, Freitas Bastos, 1970, v.1.

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

A busca constantes da qualidade e a preocupação com o atendimento ao cliente estão presentes nas ações do *SENAI*.

Introdução

De maneira geral, sempre que se lida com a eletricidade há a necessidade de se conhecer a tensão contínua em pontos de interesse de um circuito. Isto acontece, por exemplo, no trabalho de manutenção de aparelhos de rádio, televisão, vídeo etc. Os instrumentos que se prestam para esse fim, e que são largamente difundidos nos meios onde se manuseia com a eletricidade e a eletrônica, são o voltímetro ou milivoltímetro e o multímetro.

Este fascículo, que tratará da medição de tensão elétrica contínua, foi elaborado visando a capacitá-lo a medir esta grandeza elétrica.

Para ter sucesso no desenvolvimento do conteúdo e atividades deste fascículo, o leitor já deverá ter conhecimentos relativos a:

- Tensão elétrica.

Medição de tensão CC

A medição de tensão CC consiste na utilização correta de um instrumento com o objetivo de determinar a tensão presente entre dois pontos. A medição pode ser usada para determinar a tensão fornecida por uma fonte geradora de tensão CC, conforme ilustrado na **Fig.1**.

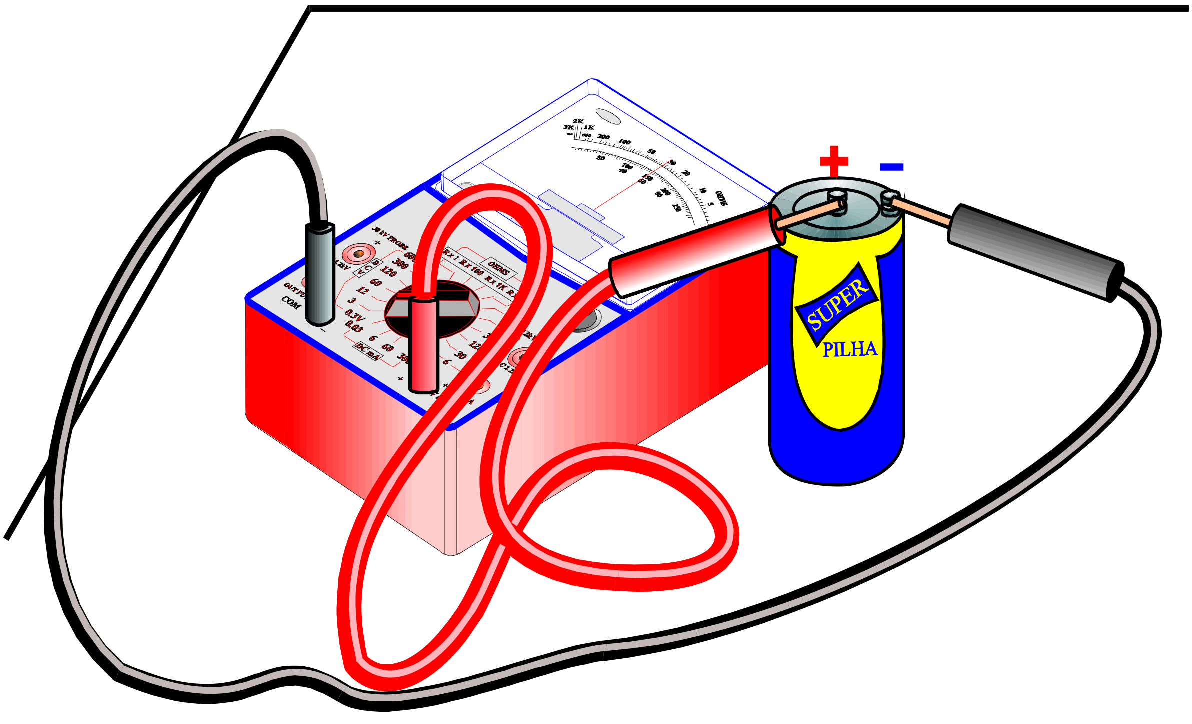


Fig.1 Medição de uma tensão CC.

Existem dois tipos de instrumentos através dos quais se pode medir tensão CC: o **voltímetro** (ilustrado na **Fig.2**) e o **multímetro** (ilustrado na **Fig.3**).

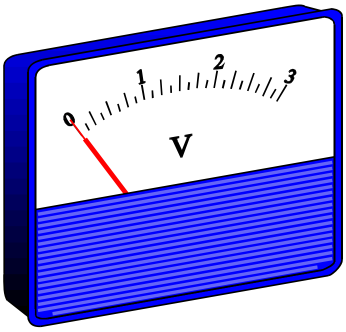


Fig.2 O voltímetro.

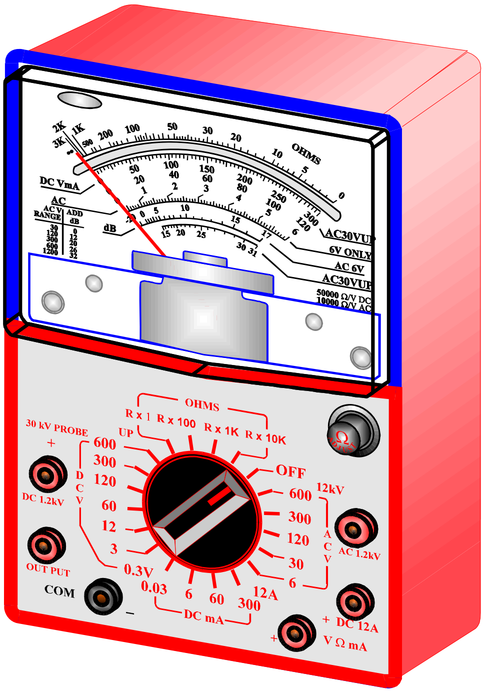


Fig.3 O multímetro.

VOLTÍMETRO E MILIVOLTÍMETRO

Os voltímetros e milivoltímetros são instrumentos próprios para a medição de tensão. Estes instrumentos apresentam a letra **V** ou **mV** na sua escala frontal, como mostrado na **Fig.4**.

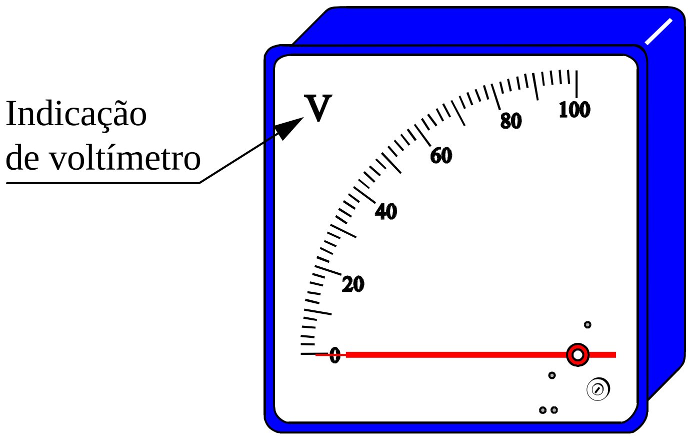


Fig.4 Vista frontal de um voltímetro.

Existem voltímetros e milivoltímetros destinados especificamente para medição de tensões contínuas. O símbolo em destaque na **Fig.5**, é utilizado para indicar que o voltímetro de bobina móvel é utilizado para medir tensões CC.

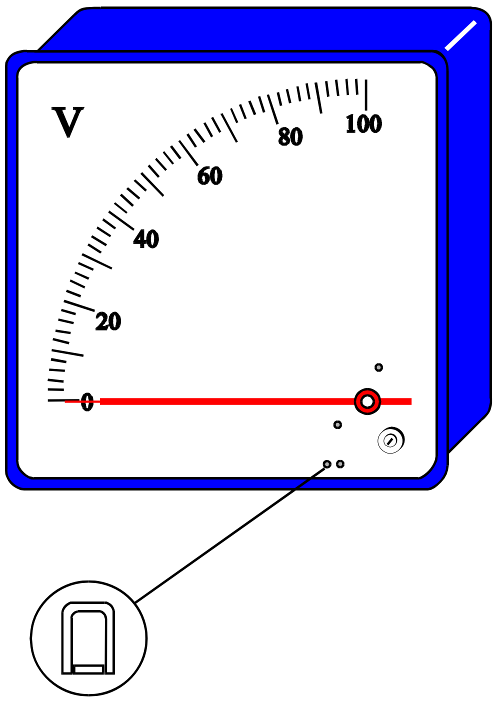


Fig.5 Voltímetro para a medição de tensão CC.

Os voltímetros e milivoltímetros para tensões contínuas têm dois **bornes** na parte posterior que se destinam a receber a tensão cujo valor será indicado na escala, conforme ilustrado na **Fig.6**.

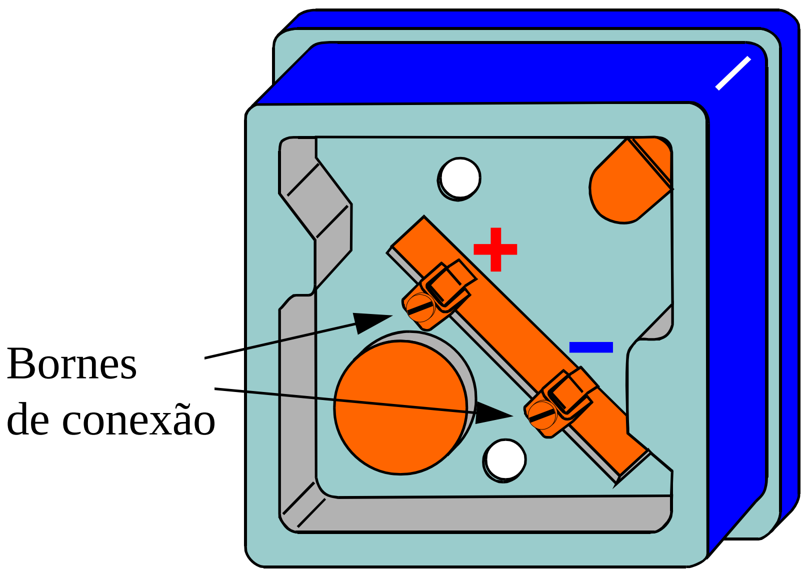


Fig.6 Vista posterior de um voltímetro.

Os bornes são identificados com os sinais + e – porque os voltímetros de CC têm polaridade estabelecida para ligação.

Os voltímetros e milivoltímetros para tensões contínuas têm polaridade de ligação especificada.

Para realizar a medição, utiliza-se normalmente conectar dois condutores chamados de **pontas de prova** aos bornes do instrumento, conforme ilustrado na **Fig.7**.

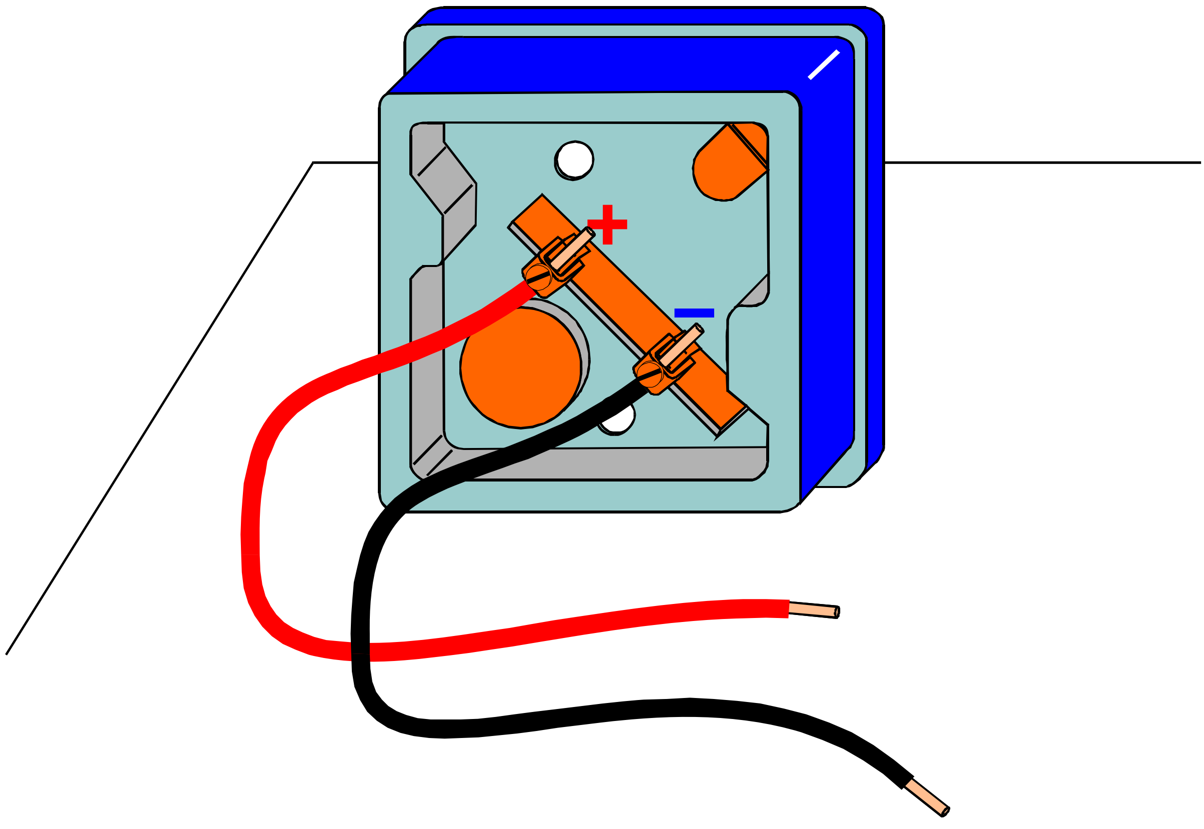


Fig.7 Conexão de duas pontas de prova nos bornes do voltímetro.

Quando se usam pontas de prova (com as cores **preta** e **vermelha**), deve-se utilizar a ponta de prova **vermelha** no borne **positivo** (+) do instrumento.

Após a conexão nos bornes do instrumento, as extremidades livres das pontas de prova são conectadas nos pontos onde se deseja medir a tensão CC. A ponta de prova **vermelha** ou o condutor que estiver conectado ao borne **positivo** (+) do instrumento, deve ser ligado no ponto **positivo** a ser medido e a outra ponta de prova no ponto **negativo**, como mostrado na **Fig.8**.

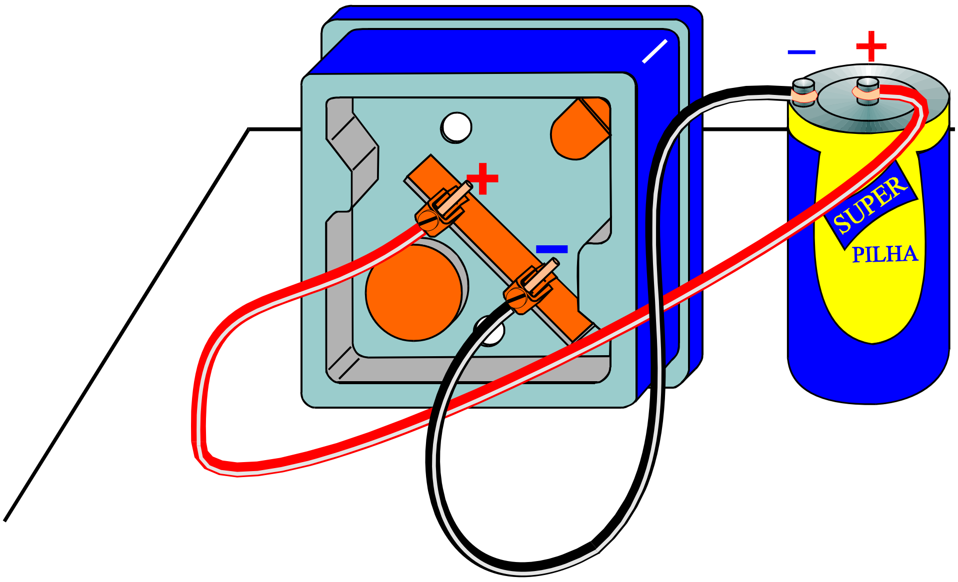


Fig.8 Conexão das pontas de prova no voltímetro e nos pontos de medição.

Quando as pontas de prova são conectadas com a polaridade correta nos pontos de medição, o ponteiro do instrumento sai da posição de repouso **deslocando-se no sentido horário** (sentido correto) em direção ao fim da escala. O valor da tensão medida é indicado na escala do instrumento, como pode ser visto na **Fig.9**.

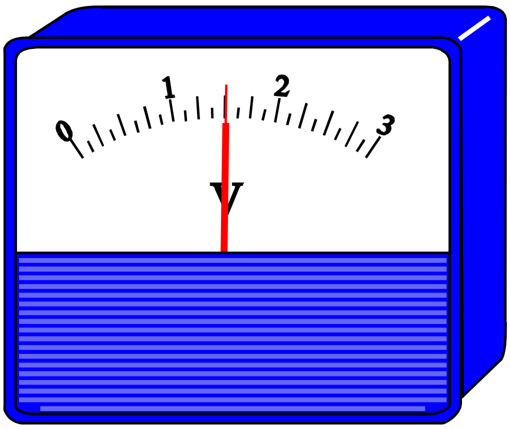


Fig.9 Deslocamento do ponteiro do voltímetro indicando o valor da medição.

Caso as pontas de prova sejam ligadas com a polaridade invertida, o ponteiro irá se **deslocar no sentido anti-horário** (sentido incorreto), conforme ilustrado na **Fig.10**. Neste caso, faz-se necessário inverter as pontas de prova nos pontos de medição.

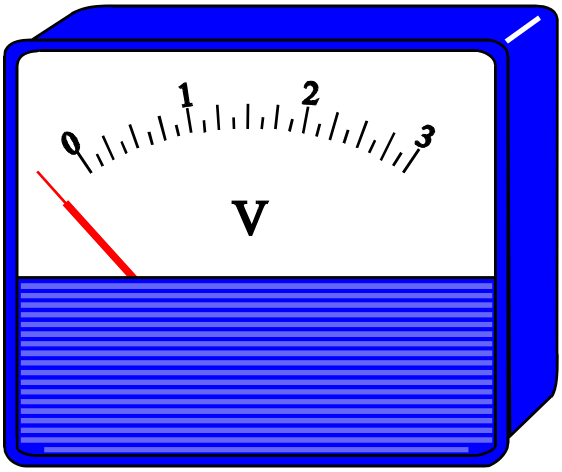


Fig.10 Deslocamento do ponteiro do voltímetro no sentido incorreto.

Multímetro

O multímetro, também conhecido por multiteste, é um instrumento que tem a possibilidade de realizar medições não só de tensão, mas também de várias outras grandezas de natureza elétrica. A **Fig.11** mostra um tipo de multímetro comum nos laboratórios de eletrônica.

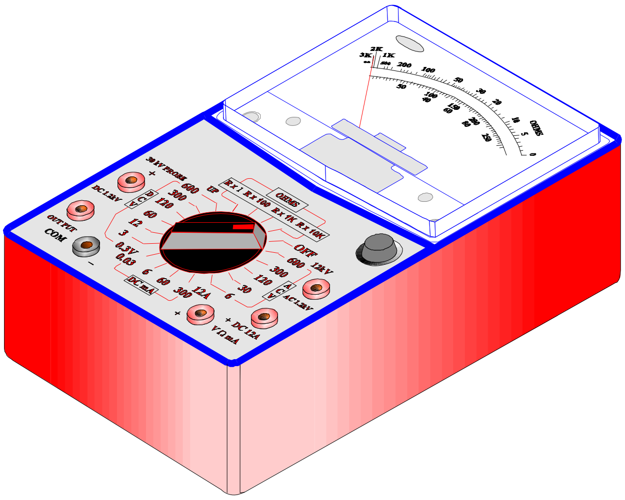


Fig.11 Aspecto de um multímetro muito comum.

O multímetro é o principal instrumento na bancada de quem trabalha com eletrônica e eletricidade. Esta importância é devida a sua simplicidade de operação, transporte e capacidade de possibilitar medições de diversas grandezas elétricas.

MEDIÇÃO DE TENSÃO CC COM O MULTÍMETRO

Entre as grandezas elétricas que podem ser medidas com o multímetro está a tensão contínua. Tendo em vista que o multímetro é um instrumento múltiplo isto é, pode ser utilizado para diversos tipos de medição, os conhecimentos e procedimentos necessários para o seu uso correto serão apresentados por parte, iniciando-se pela medição de tensão contínua.

A **Fig.12** mostra o painel de um multímetro ressaltando as partes utilizadas para a medição de tensão contínua.

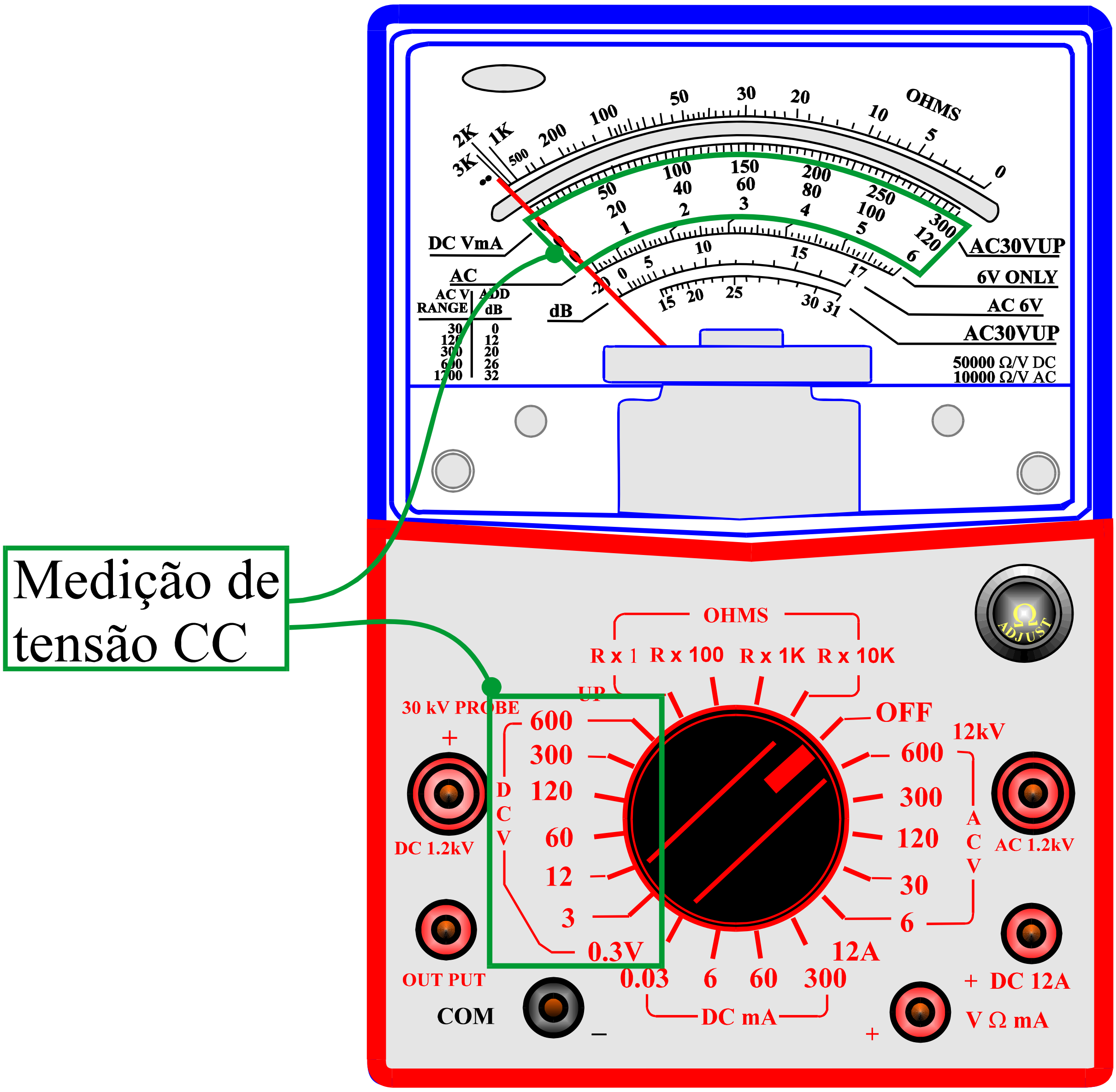


Fig.12 Painel de um multímetro.

Um dos bornes é comum para qualquer tipo de medição com o instrumento. Este borne é indicado pela abreviatura **COM** ou pelo sinal **negativo** (–). Neste borne, conecta-se a ponta de prova **preta**, conforme ilustrado na **Fig.13**. O outro borne, que é indicado pela abreviatura **DC** ou pelo sinal (+), recebe a ponta de prova **vermelha**.

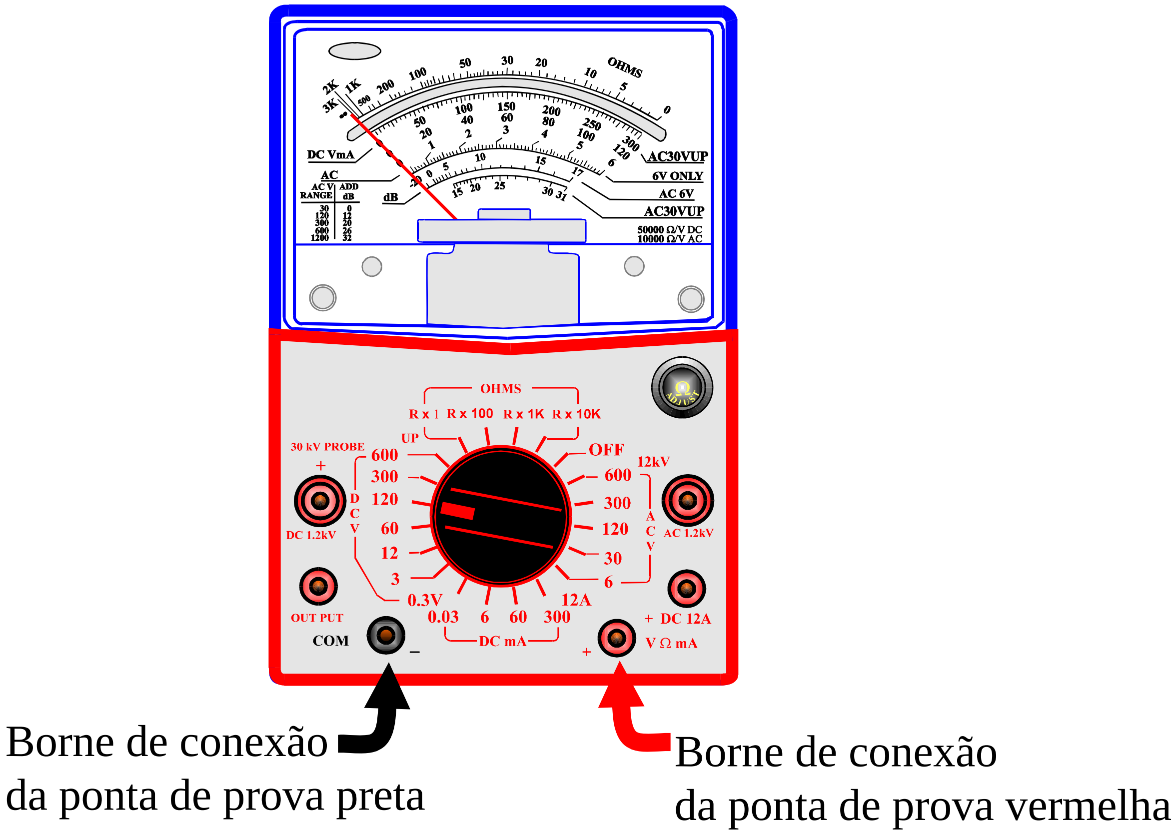


Fig.13 Bornes de conexão das pontas de prova do multímetro.

A ponta de prova preta é sempre conectada ao borne comum do multímetro que é indicado pela abreviatura COM ou pelo sinal negativo (-).

A função da **chave seletora** é determinar:

- Que grandeza elétrica vai ser medida (por exemplo: tensão contínua).
- Qual o valor máximo que o instrumento pode medir nesta posição (por exemplo 12V).

As posições da chave seletora que são destinadas à medição de tensão contínua são identificadas pela abreviatura **DC V** ou apenas **DC**, como mostrado na **Fig.14**.

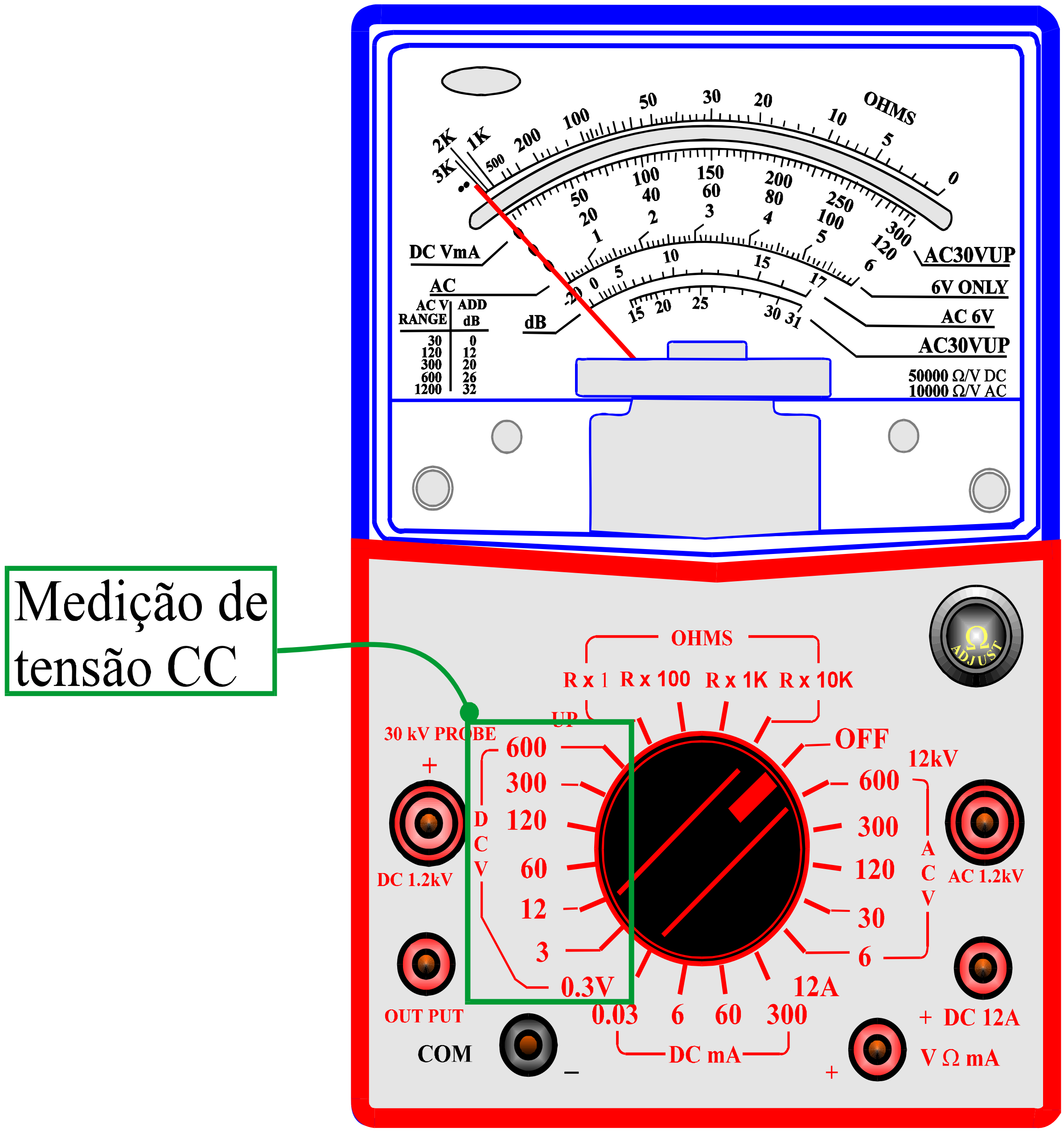


Fig.14 Chave seletora na posição **DCV**.

As posições da chave seletora destinadas à medição de tensão contínua são indicadas pelas abreviaturas DC V ou DC.

Deve-se sempre ter em mente que o valor indicado pela chave seletora é o máximo que o instrumento pode medir nesta posição da chave. No exemplo da **Fig.15**, a tensão contínua máxima que o instrumento pode medir com a chave seletora nesta posição é 120V.

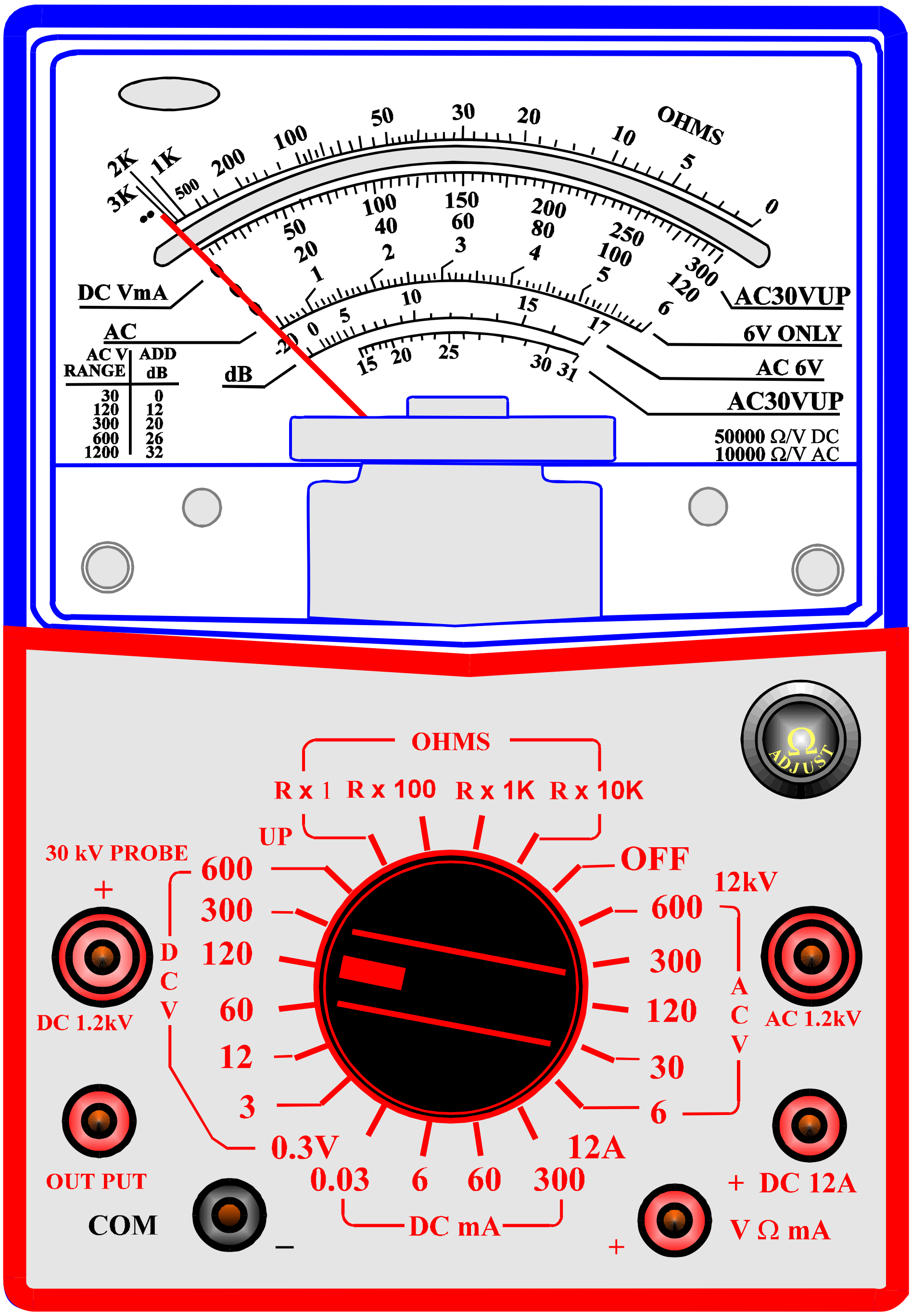


Fig.15 Chave seletora indicando a tensão máxima que pode ser medida.

A **escala** do multímetro é usada para a leitura do valor medido pelo instrumento. Como o multímetro se destina a um grande número de medições, a sua escala é múltipla, como mostrado na **Fig.16**.

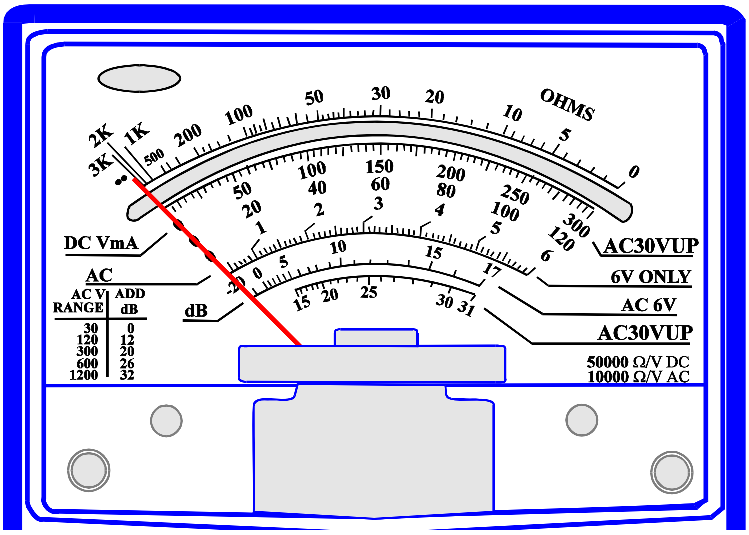


Fig.16 Painel de um multímetro mostrando diversas escalas.

As escalas destinadas à medição de tensão contínua são indicadas pelas abreviaturas **DC V** ou **DC,** conforme ilustrado na **Fig.17**.

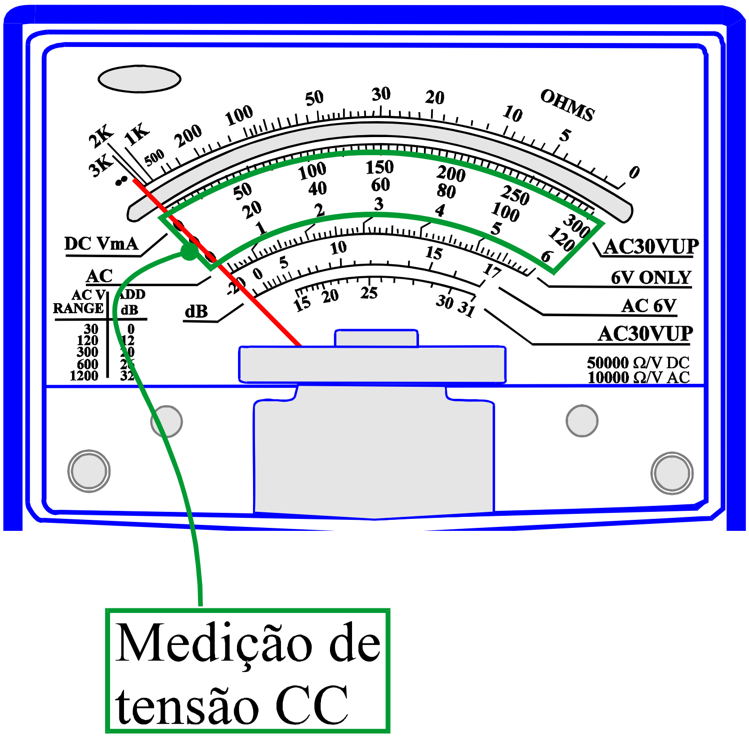


Fig.17 Indicação da escala para a medição de tensão contínua.

PROCEDIMENTO PARA MEDIÇÃO DE TENSÃO CONTÍNUA COM MULTÍMETRO

Sempre que se utiliza um multímetro para uma medição, deve-se seguir um procedimento padronizado. A correta utilização deste procedimento deve tornar-se um hábito para que o instrumento não seja danificado em uma operação mal executada. Este procedimento está apresentado a seguir:

CONEXÃO DAS PONTAS DE PROVA AO MULTÍMETRO

Conectam-se as pontas de prova nos bornes do instrumento. Ponta **vermelha** no borne **DC** ou positivo (+) e ponta **preta** no borne comum (**COM**) ou **negativo** (–), como mostrado na **Fig.18**.

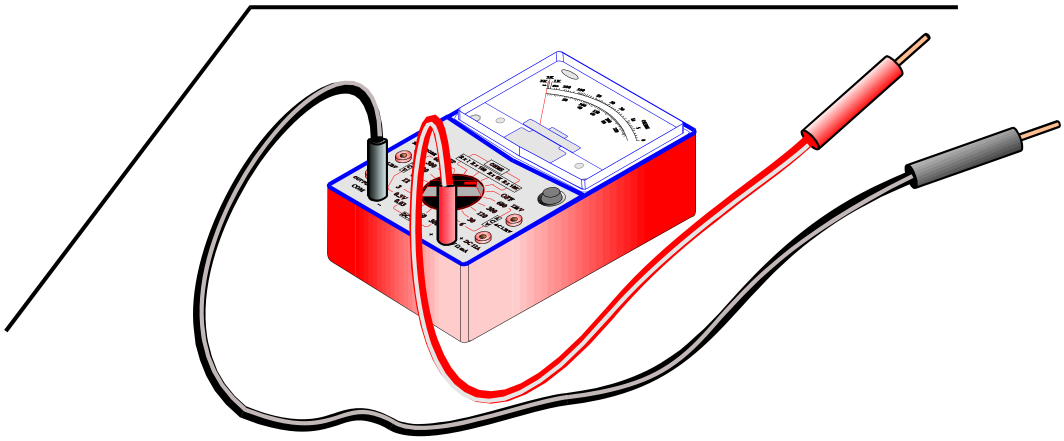


Fig.18 Conexão no instrumento das pontas de prova **vermelha** e **preta**.

SELEÇÃO DA ESCALA DE TENSÃO CONTÍNUA NO MULTÍMETRO

É a determinação da posição correta do seletor de escalas para a realização de uma medição de tensão. A seleção da escala possibilita a realização da medição e garante a segurança do equipamento. Quando se conhece aproximadamente o valor que vai ser medido, posiciona-se a chave seletora para a escala de tensão imediatamente superior ao valor estimado.

A chave seletora deve ser sempre posicionada para um valor mais alto que a tensão que será medida.

Por exemplo, para medir-se a tensão de uma pilha que tem valor máximo de 1,5V, seleciona-se uma escala de 2,5V ou 3V, ou outras próximo a estas, a depender das escalas de que o instrumento dispuser, conforme ilustrado na **Fig.19**.

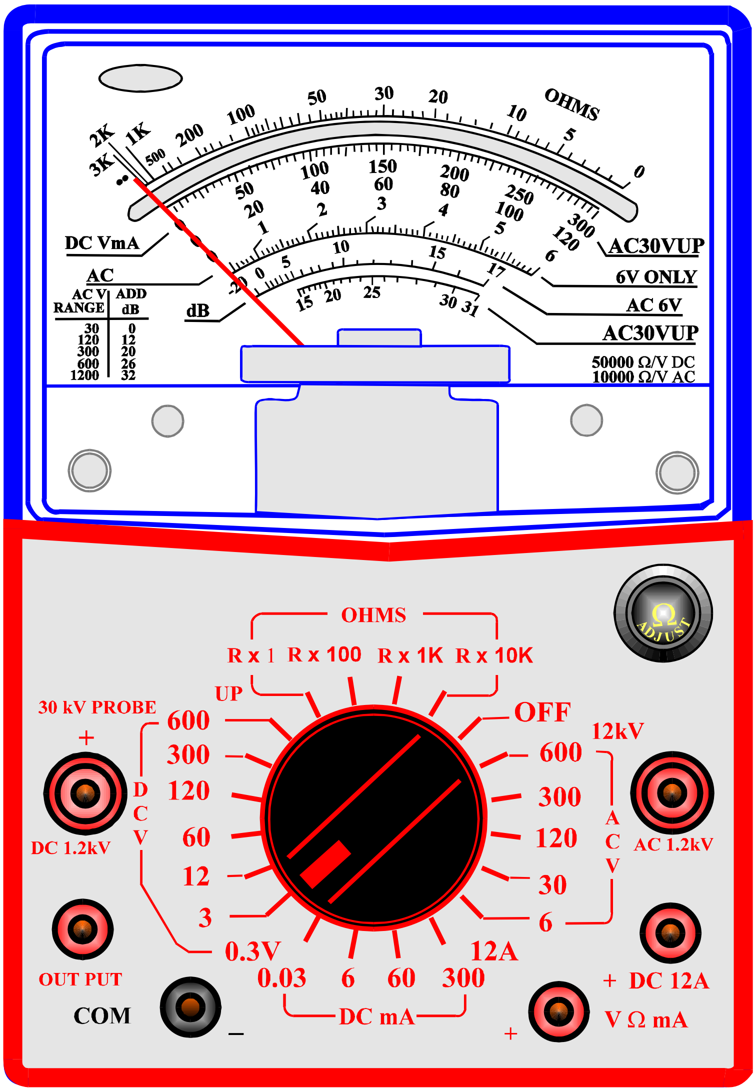


Fig.19 Escala de 3V para a medição da tensão de uma pilha de 1,5V.

Se o valor a ser medido é completamente desconhecido, deve-se procurar uma pessoa que possa fornecer maiores informações (por exemplo o instrutor). Caso contrário, a escolha de uma escala inadequada pode queimar o instrumento.

CONEXÃO DO MULTÍMETRO PARA MEDIÇÃO

Após a colocação das ponteiras e a correta seleção da escala, as extremidades livres das pontas de prova são conectadas aos pontos de medição. A ponta de prova **vermelha** é conectada ao ponto de medida **positivo (+)** e a **preta** ao **negativo (-)**. Com a conexão correta das pontas de prova, o ponteiro do instrumento deve mover-se no sentido horário, como ilustrado na **Fig.20**.

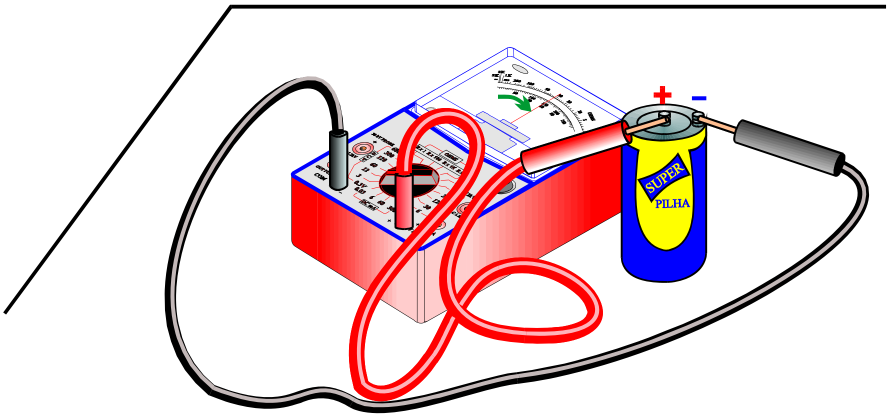


Fig.20 Posição do ponteiro após mover-se no sentido horário.

LEITURA DA ESCALA

Após a conexão das pontas de prova nos pontos de medição, o ponteiro se move e depois para em uma posição definida. Como mostrado na **Fig.21**, para realizar a leitura corretamente, o observador deve posicionar-se frontalmente ao painel de escalas.

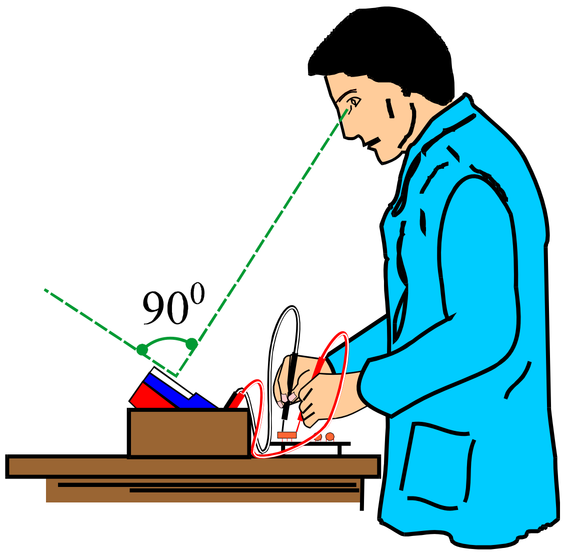


Fig.21 Posicionamento correto do observador.

Os multímetros de boa qualidade possuem uma faixa espelhada nas escalas do painel, conforme ilustrado na **Fig.22**.

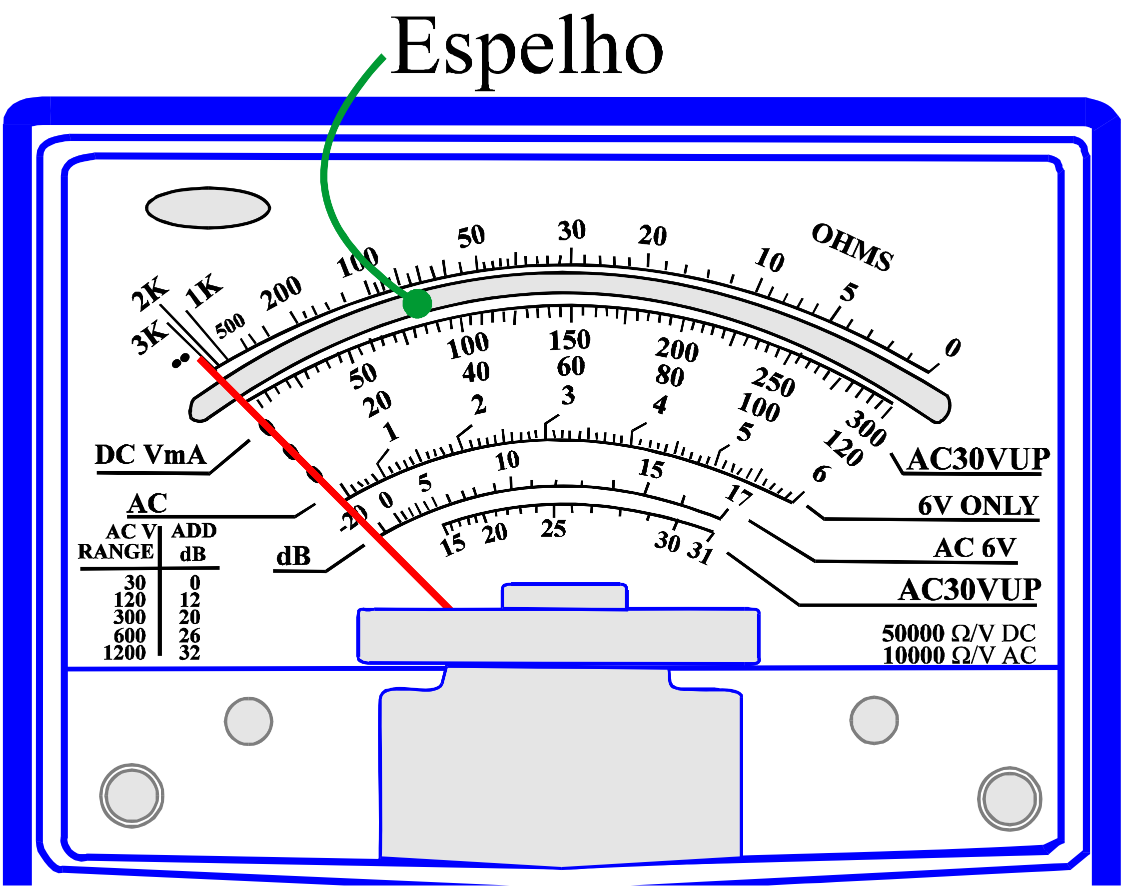


Fig.22 Superfície espelhada no painel do multímetro.

Ao fazer a leitura, o observador deve posicionar-se de tal forma que o reflexo do ponteiro no espelho não seja visível. Nesta situação, a posição do observador é frontal.

O valor da tensão medida é determinado **pela posição do ponteiro** e **pela posição da chave seletora**.

Em geral, os multímetros têm 5 (cinco) ou mais posições na chave seletora para a medição de tensão **DC** e apenas 3 (três) escalas no painel de leitura. A **Fig.23** apresenta um tipo de multímetro.

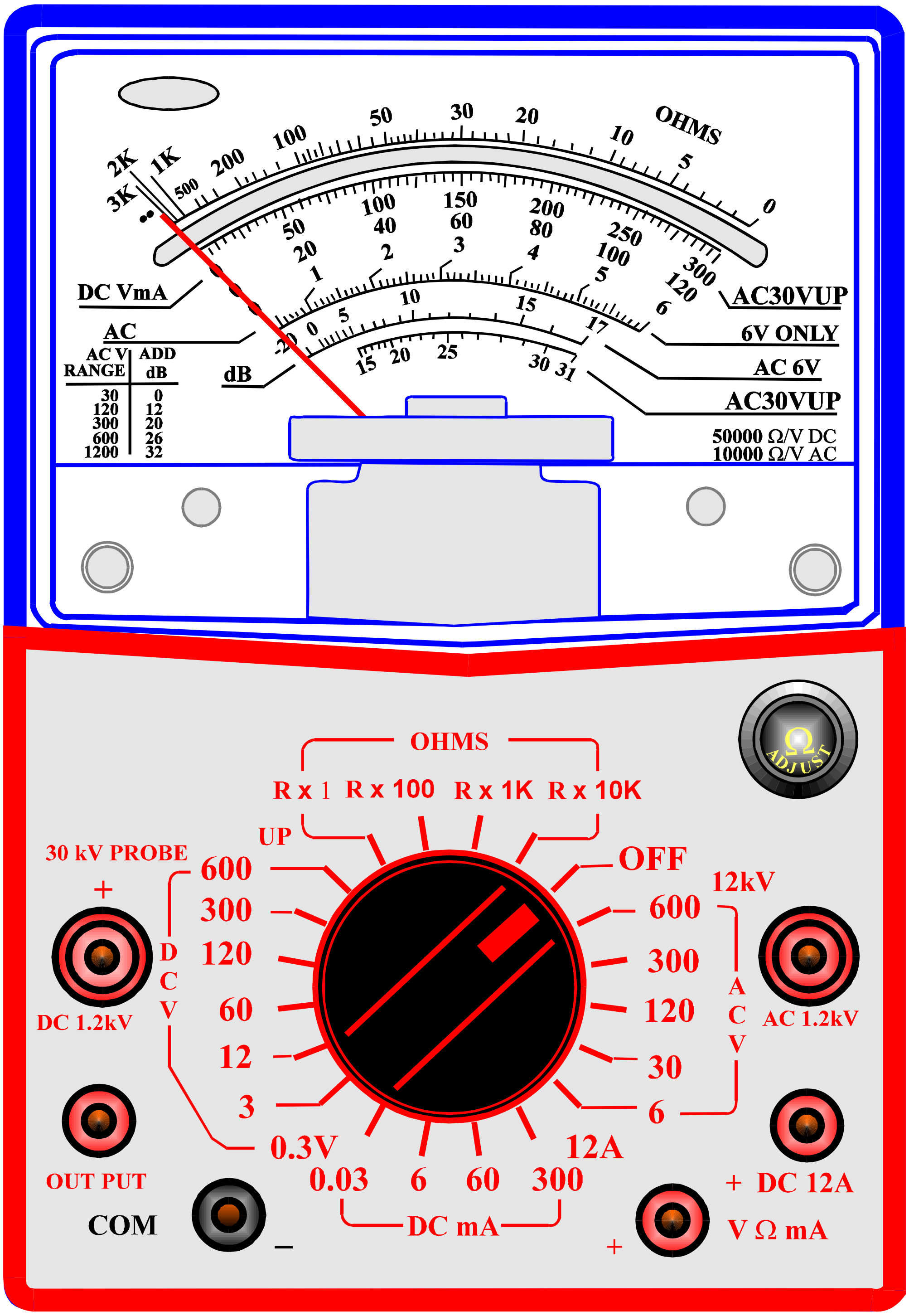


Fig.23 Um tipo comum de multímetro.

Neste multímetro, as posições da chave seletora para tensão **DC** são: 0,3V, 3V, 12V, 60V, 120V, 300V e 600V. O painel apresenta apenas 3 (três) escalas. São elas: 0 a 6, 0 a 120 e 0 a 300. Por esta razão, cada escala do painel é utilizada para mais de uma posição da chave seletora. A escala de 0 a 300 é usada para as posições 3 a 300V da chave seletora, conforme ilustrado na **Fig.24**.

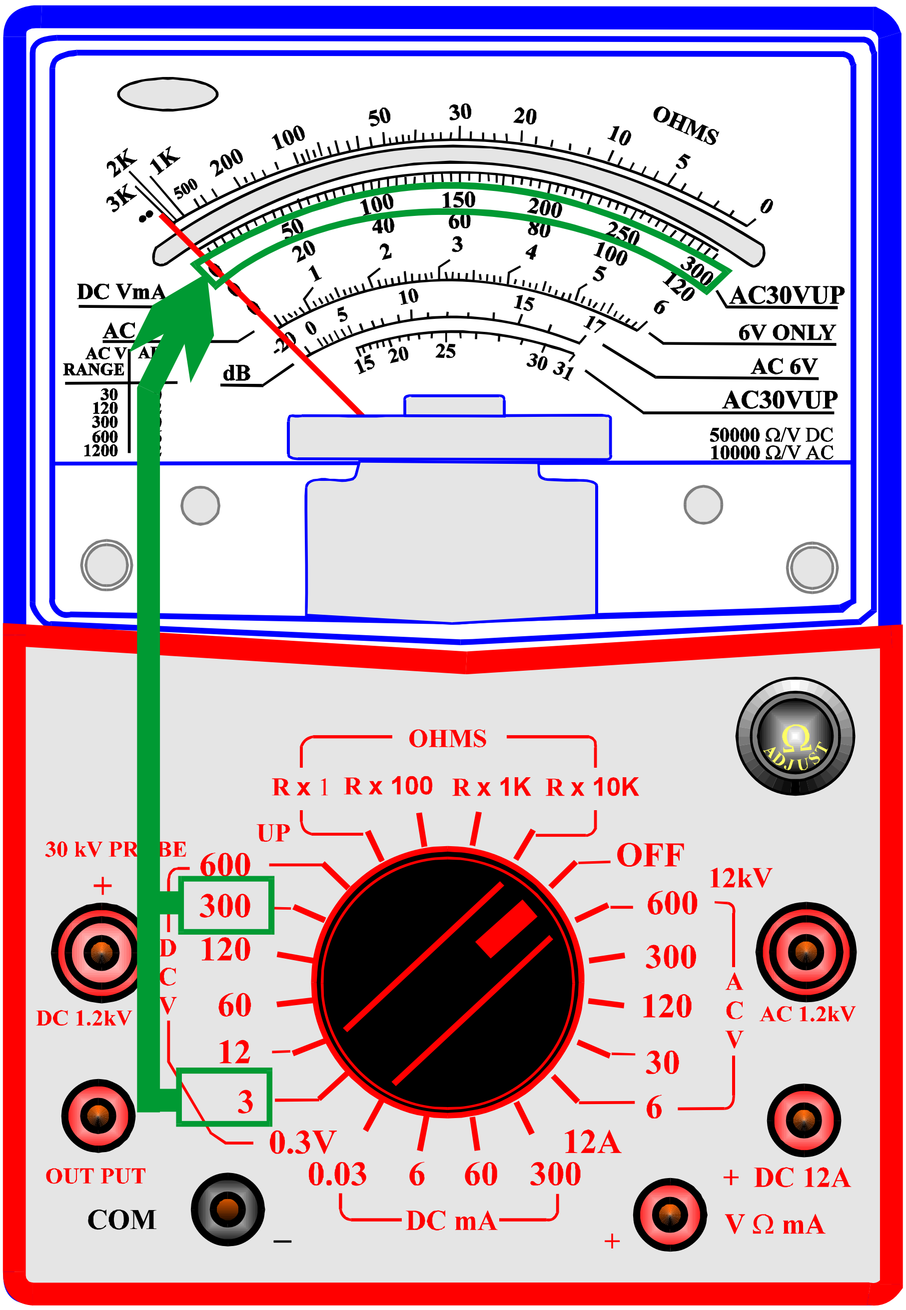


Fig.24 Escala de 0 a 300V que é usada para as posições 3V e 300V da chave seletora.

Quando a chave seletora indica a posição DCV 300, a leitura é feita na escala de 0 a 300, conforme ilustrado no exemplo da **Fig.25**.

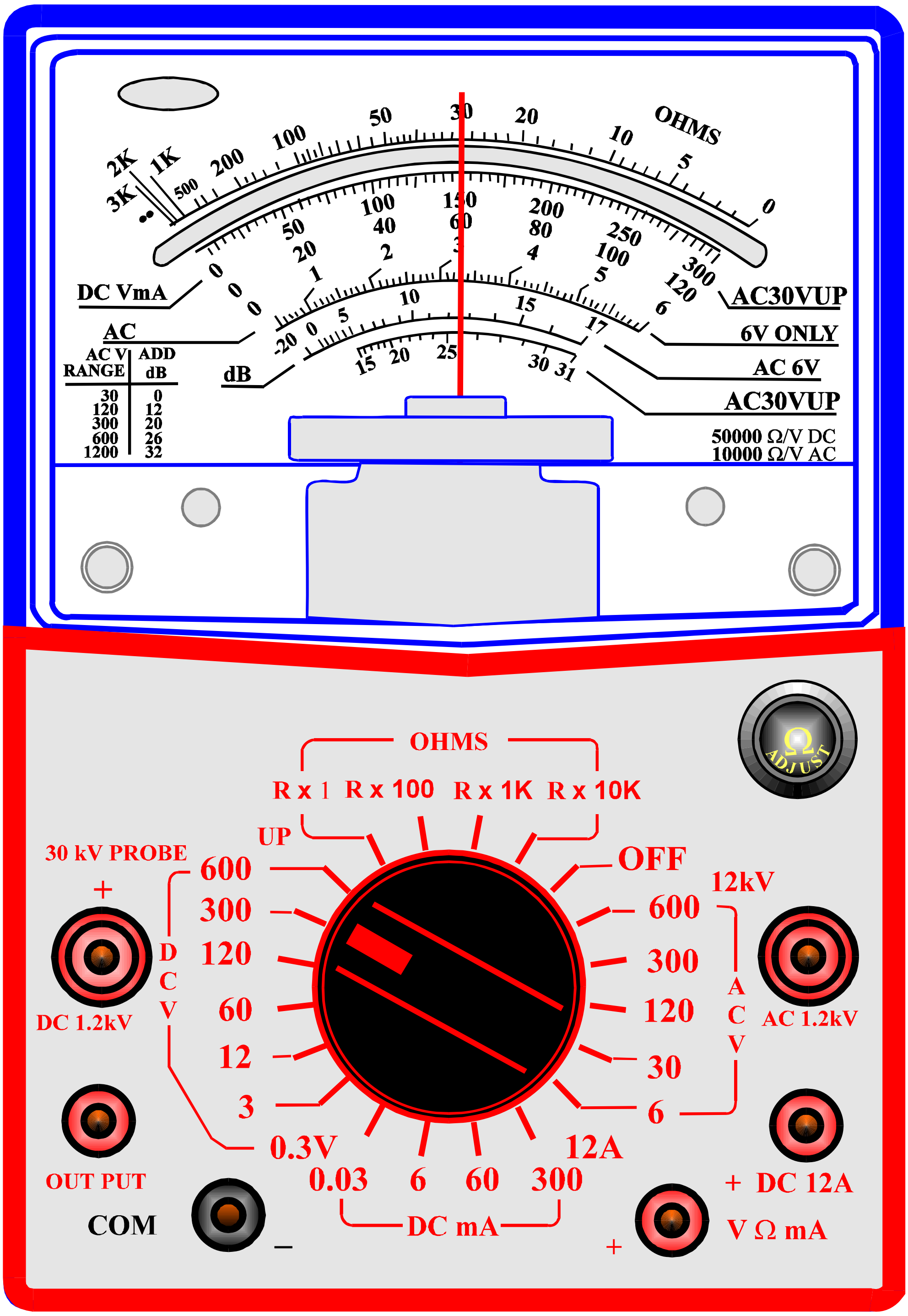


Fig.25 Leitura de uma tensão de 150V com a chave seletora posicionada na posição DCV 300 e leitura na escala de 0 a 300V.

Quando a chave seletora está na posição 3V, faz-se a leitura na escala de 0 a 300 e divide-se o valor lido por 100 (300÷100 = 3), como ilustrado na **Fig.26**.

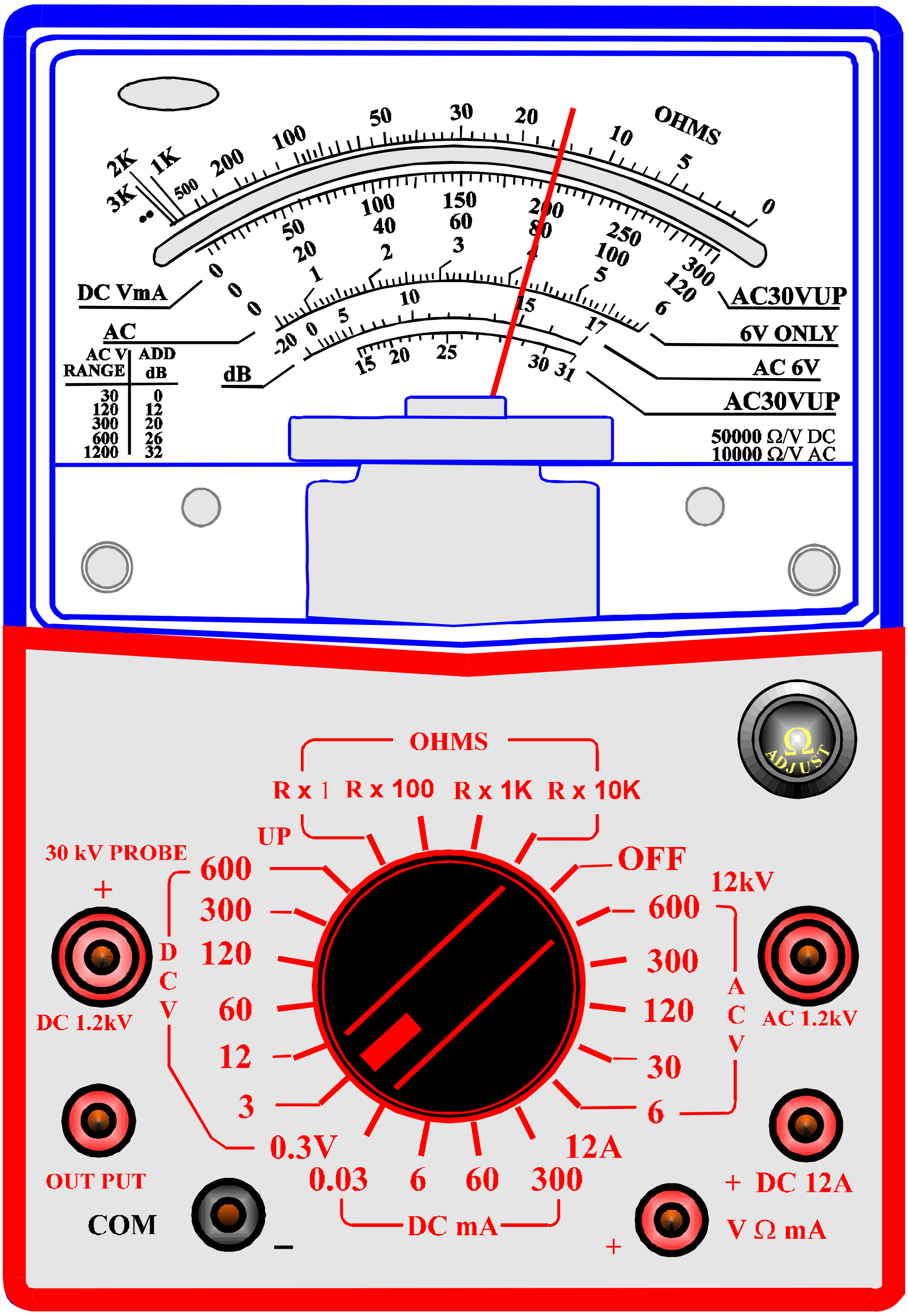


Fig.26 Leitura de uma tensão de 2V com a chave seletora posicionada na posição DCV 3 e leitura na escala de 0 a 300V.

A escala de 0 a 120 é utilizada para as posições de 120V e 12V da chave seletora (múltiplos de 12), como mostrado na **Fig.27**.

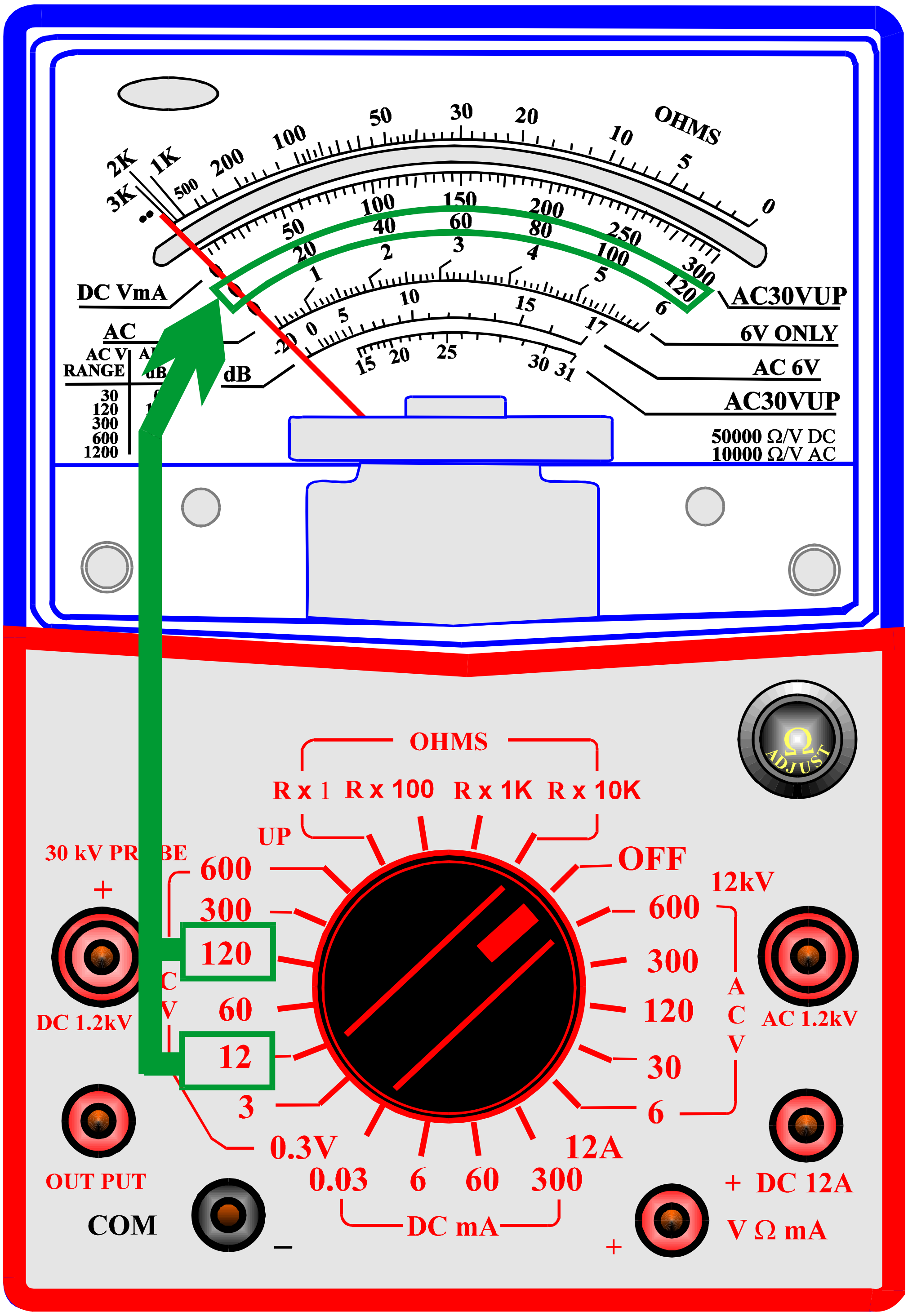


Fig.27 Escala de 0 a 120V que é usada para as posições 120V e 12V da chave seletora.

Quando a chave seletora está na posição DC V 120, a leitura é feita diretamente na escala de 0 a 120, como mostrado na **Fig.28**.

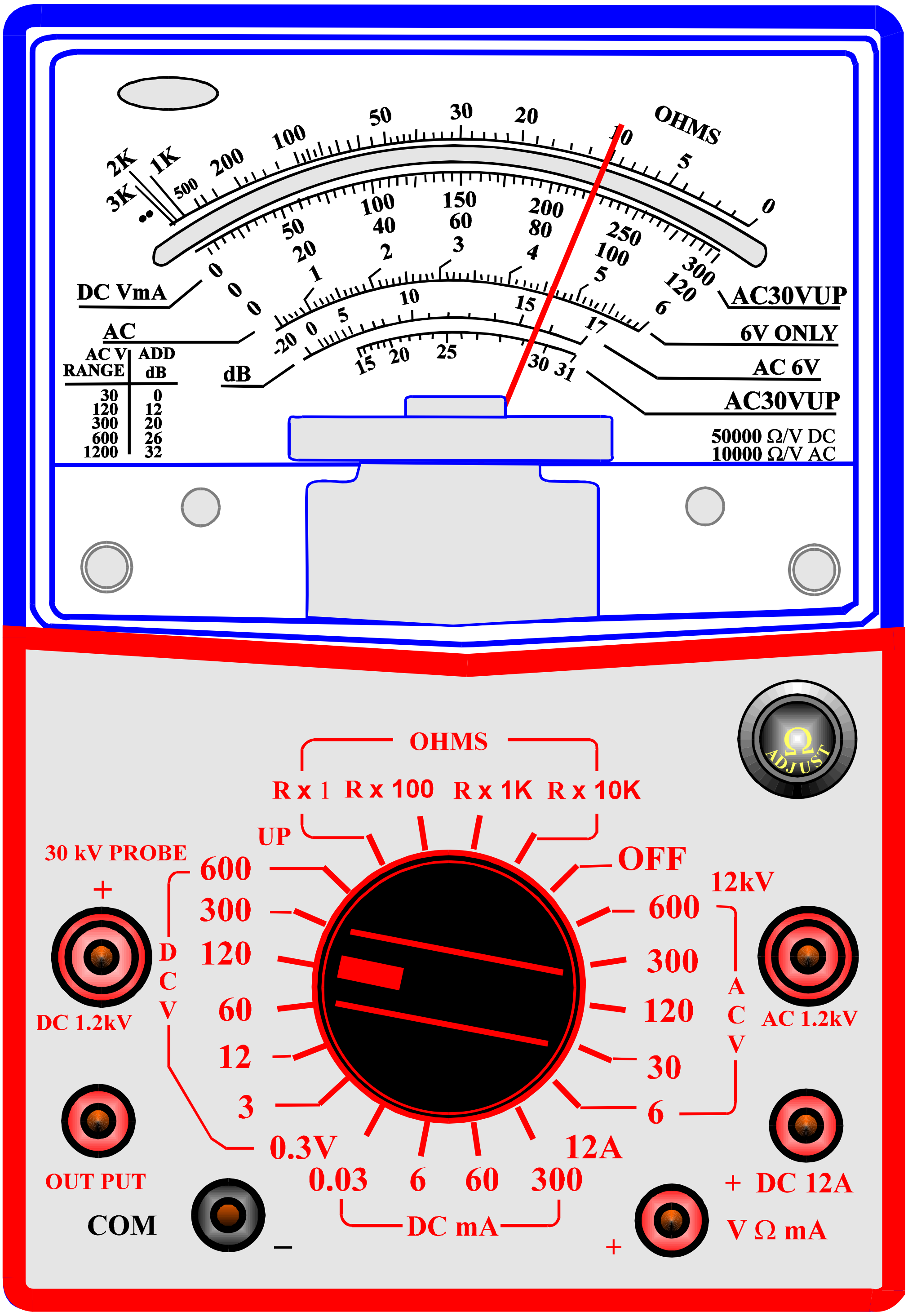


Fig.28 Leitura de uma tensão de 90V com a chave seletora posicionada na posição DCV 120 e leitura na escala de 0 a 120V.

Para a posição DC V 12, a leitura é feita na escala de 0 a 120 e o valor lido é dividido por 10, conforme ilustrado na **Fig.29.**

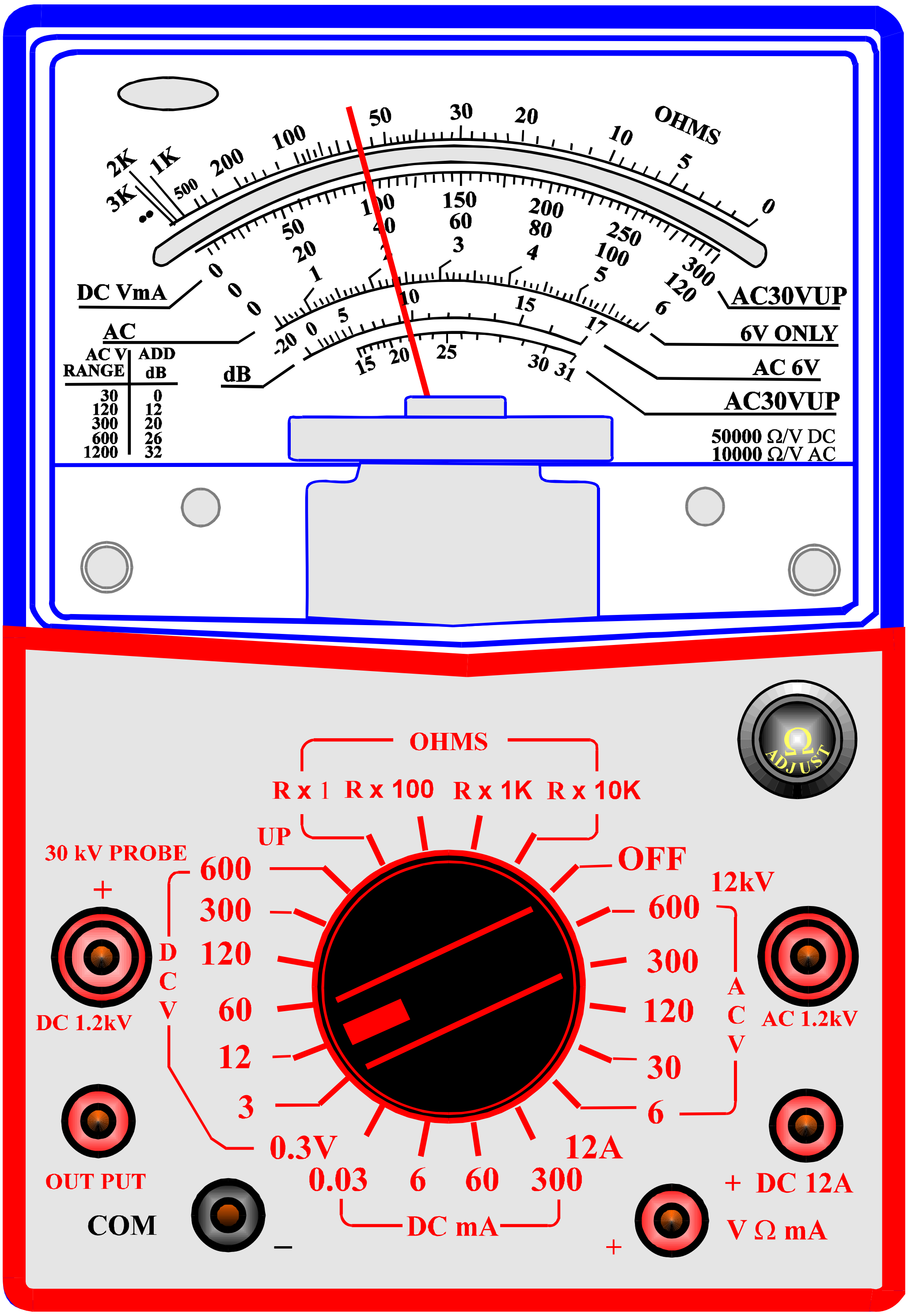


Fig.29 Leitura de uma tensão de 4V com a chave seletora posicionada na posição DCV 12 e leitura na escala de 0 a 120V.

A escala de 0 a 6 é usada para as posições 60V e 600V da chave seletora (múltiplos de 6), conforme ilustrado na **Fig.30**.

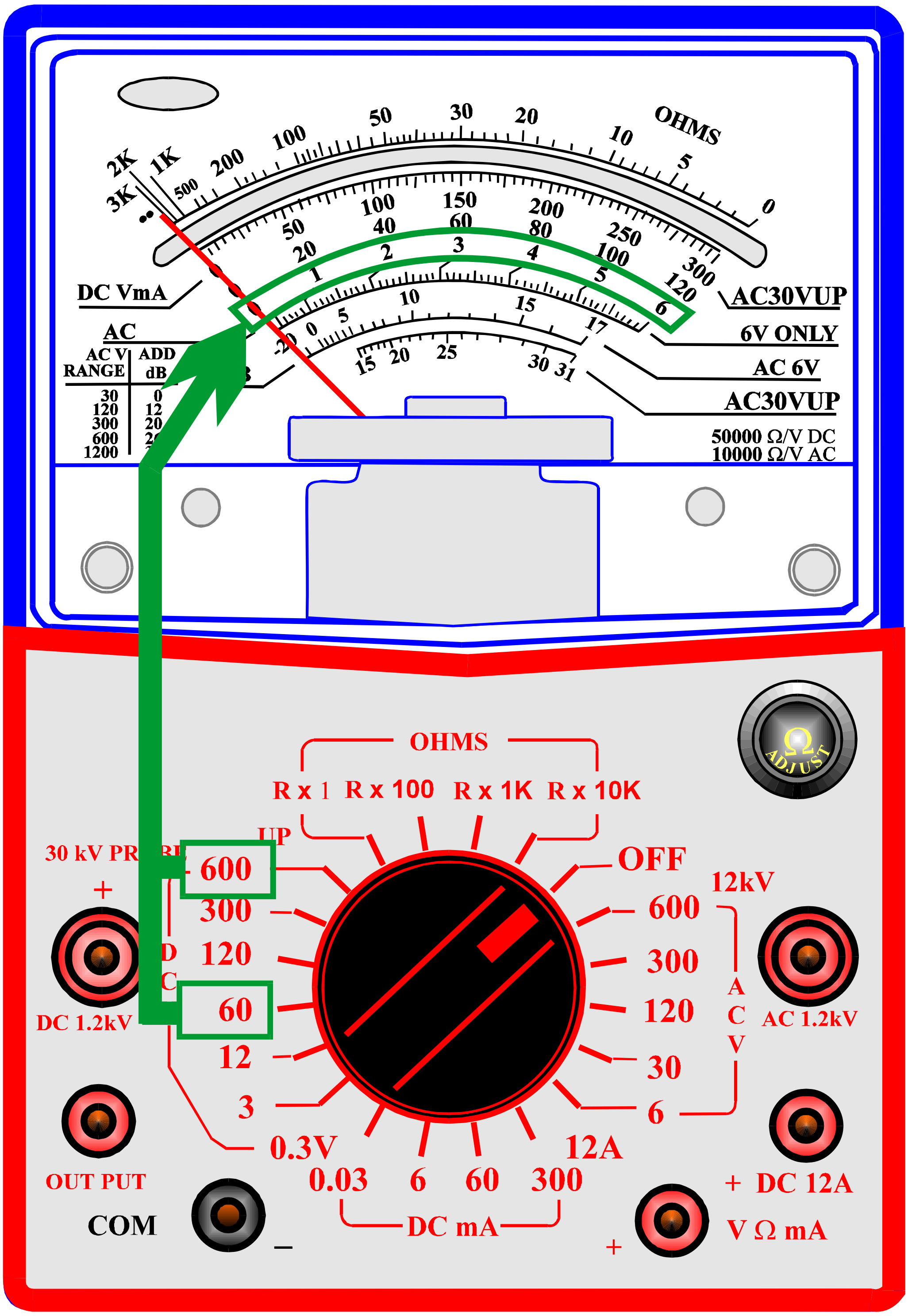


Fig.30 Escala de 0 a 6V que é usada para as posições 60V e 600V da chave seletora.

Na posição DCV 60, a leitura é feita na escala de 0 a 6 e o valor lido é multiplicado por 10, conforme ilustrado na **Fig.31**.

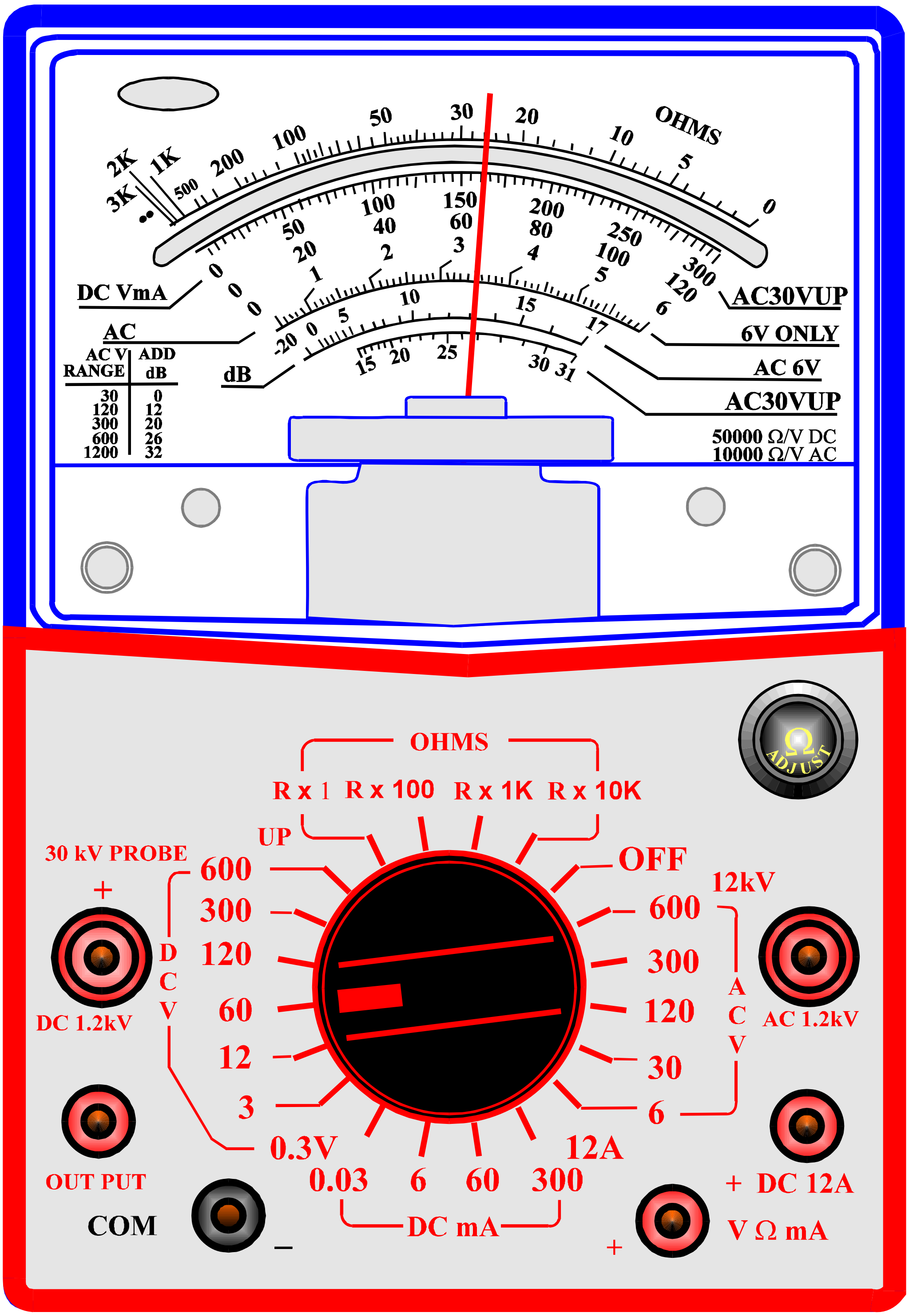


Fig.31 Leitura de uma tensão de 35V com a chave seletora posicionada na posição DC V 60 e leitura na escala de 0 a 6V.

Na posição DCV 600, a leitura é feita na escala de 0 a 6 e o valor lido é multiplicado por 100, conforme ilustrado na **Fig.32**.

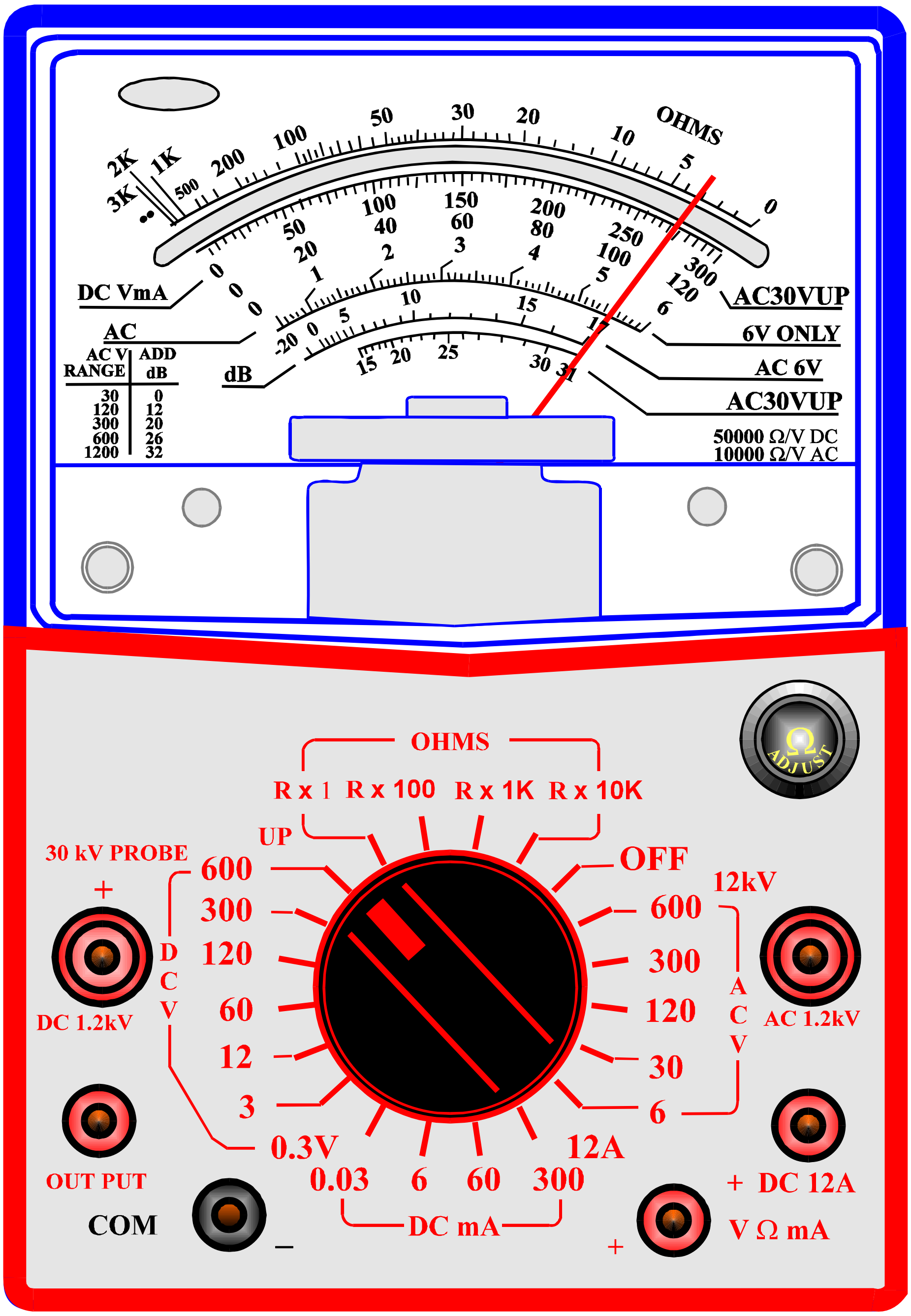


Fig.32 Leitura de uma tensão de 550V com a chave seletora posicionada na posição DCV 600 e leitura na escala de 0 a 6V.

Inicialmente, a interpretação de valores de tensão a partir do multímetro pode parecer difícil. Entretanto, com o uso constante deste instrumento, o procedimento de leitura será automaticamente exercitado e se tornará fácil.

CUIDADOS COM O MULTÍMETRO

O multímetro é um instrumento utilizado no dia a dia de quem lida com eletrônica e eletricidade. A utilização de alguns procedimentos relativos à segurança, conservação e manejo contribuem para a manutenção do equipamento em boas condições de uso durante muito tempo.

Estes procedimentos estão listados a seguir:

PROCEDIMENTOS DE SEGURANÇA

- Mantenha o multímetro sempre longe das extremidades da bancada.
- O multímetro não deve ser empilhado sobre qualquer objeto ou equipamento.
- Sempre que o instrumento não estiver em uso, posicione a chave seletora de escala para a posição desligado (OFF). Caso isto não seja possível, posicione a chave seletora para a posição ACV na maior escala.

PROCEDIMENTOS DE CONSERVAÇÃO

- Faça a limpeza do instrumento apenas com pano limpo e seco.

PROCEDIMENTOS DE MANUSEIO

- A chave seletora deve ser posicionada adequadamente para cada tipo de medição.
- As pontas de prova devem ser introduzidas nos bornes apropriados.
- A polaridade deve estar sempre sendo observada nas medições de tensão CC.
- A tensão a ser medida não deve exceder o valor determinado pela chave seletora do instrumento.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Quais as abreviaturas usadas para indicar a medição de tensão contínua ?
2. Na medição de tensão, para que valor deve ser posicionada a chave seletora ?
3. Quais as unidades básicas que se deve ter com o uso de um multímetro ?

BIBLIOGRAFIA

LANG, JOHANNES G. **Corrente, tensão, resistência** : EP 02 [Strom, - Spannung - Widerstand] Traduzido e adaptado pelo Setor de Divulgação Tecnológica, Siemens. 2.ª ed. São Paulo, Siemens/Edgard Blücher, 1977, 73p.

SCHUSTER, KARL. **Constituição da Matéria**: EP 01 [Aufbau der Materie] Traduzido e adaptado pelo Setor de Divulgação Tecnológica, Siemens. 2.ª ed. São Paulo, Siemens/Edgard Blücher, 1977, 62p.

VAN VALKENBURG, NOOGER & NEVILLE. **Eletricidade Básica**, 15.ª ed., São Paulo, Freitas Bastor, 1970, vol.1.

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

No *SENAI* a Formação Profissional está voltada para a Educação permanente e a cidadania.

Introdução

A eletricidade está presente diariamente na vida do homem moderno, seja na forma de um relâmpago num dia de tempestade ou no simples ligar de uma lâmpada. A nossa volta, milhões de cargas elétricas fluem sem que percebamos, originando efeitos que nos são agradáveis, tais como luz, som, calor etc.

Para se entender como são obtidos estes efeitos, faz-se necessário, em primeiro lugar, compreender o movimento das cargas elétricas e suas particularidades.

Este fascículo foi elaborado para isso e tratará, portanto, das grandezas corrente e resistência elétrica, visando a capacitá-lo a interpretar e medir resistência elétrica inclusive caracterizando os seus efeitos sobre a circulação da corrente.

Para ter sucesso no desenvolvimento do conteúdo e atividades deste fascículo, o leitor já deverá ter conhecimentos relativos a:

- Estrutura da matéria.
- Diferença de potencial entre dois pontos.

Corrente elétrica

A corrente elétrica consiste em um movimento orientado de cargas, provocado pelo desequilíbrio elétrico (ddp) existente entre dois pontos, como mostrado na **Fig.1**.



Fig.1 Origem da corrente elétrica.

A corrente elétrica é a forma pela qual os corpos eletrizados procuram restabelecer novamente o equilíbrio elétrico.

DESCARGAS ELÉTRICAS

As descargas elétricas são fenômenos comuns na natureza. Os relâmpagos são exemplos característicos de descargas elétricas.

O atrito contra o ar faz com que as nuvens fiquem altamente eletrizadas, adquirindo um potencial elevado (tensão muito alta). Quando duas nuvens com potenciais elétricos diferentes se aproximam uma da outra, ocorre uma descarga elétrica (relâmpago) entre elas, como ilustrado na **Fig.2**.

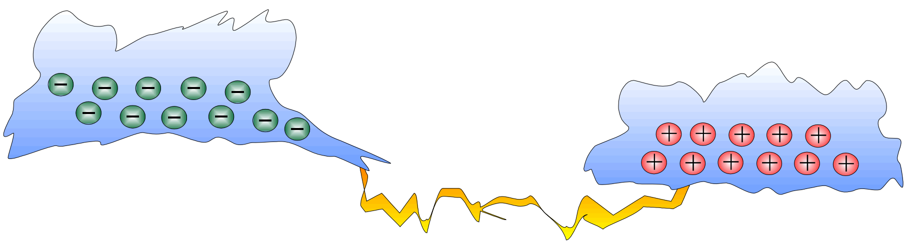


Fig.2 Descarga elétrica entre duas nuvens com potenciais diferentes.

Esta descarga nada mais é do que uma transferência orientada de cargas elétricas de uma nuvem para a outra.

A descarga elétrica é o movimento de cargas elétricas orientado entre dois pontos onde exista ddp.

Durante a descarga, um grande número de cargas elétricas é transferido numa única direção para diminuir o desequilíbrio elétrico entre dois pontos, conforme mostrado na **Fig.3**.

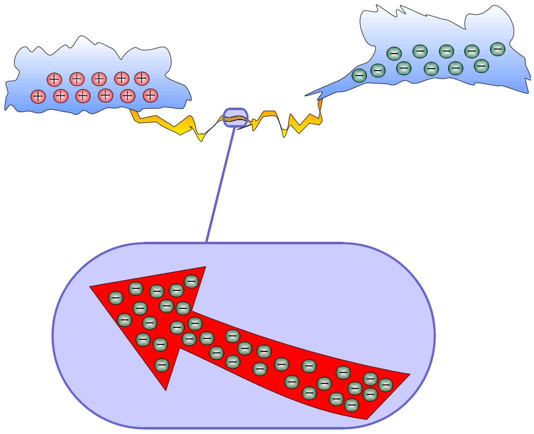


Fig.3 Movimento de cargas elétricas entre nuvens de diferentes potenciais.

Os elétrons que estão em excesso em uma nuvem se deslocam para a nuvem que tem falta de elétrons.

O deslocamento de cargas elétricas entre dois pontos onde existe uma **ddp** é denominado de corrente elétrica.

Corrente elétrica é o deslocamento orientado de cargas elétricas entre dois pontos quando existe uma ddp entre estes pontos.

A partir da definição de corrente elétrica, pode-se concluir que o relâmpago é uma corrente elétrica que ocorre devido à tensão elétrica existente entre as nuvens.

Durante o curto tempo de duração de um relâmpago, um grande número de cargas elétricas flui de uma nuvem para outra. Dependendo da grandeza do desequilíbrio elétrico entre as duas nuvens, a descarga (corrente elétrica) entre elas pode ter maior ou menor intensidade.

UNIDADE DE MEDIDA DA INTENSIDADE DE CORRENTE ELÉTRICA

A corrente é uma grandeza elétrica e sua intensidade pode ser medida com um instrumento.

A unidade de medida da intensidade da corrente elétrica é o ampère e é representada pelo símbolo A.

Ampère é a unidade de medida da intensidade de corrente elétrica.

Uma intensidade de corrente de 1A significa que $6{,}25 \times 10^{18}$ cargas elétricas passam em 1 segundo por um determinado ponto.

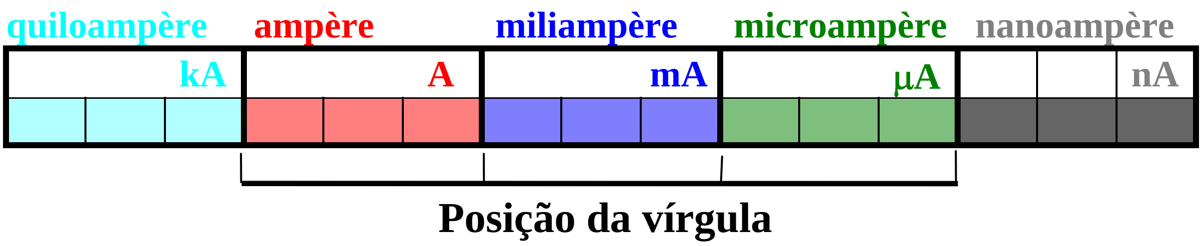
A unidade de intensidade de corrente também tem múltiplos e submúltiplos conforme apresentado na **Tabela 1**.

Tabela 1 Múltiplos e submúltiplos do ampére.

Denominação	Símbolo	Relação com a unidade
Quiloampère	kA	10^{3}A ou 1.000A
Ampère	A	-
Miliampère	mA	10^{-3}A ou 0,001A
Microampère	μA	10^{-6}A ou 0,000001A
Nanoampère	nA	10^{-9}A ou 0,000000001A
Picoampère	PA	10^{-12}A ou 0,000000000001A

No campo da eletrônica são mais utilizados o ampère, miliampère e o microampère.

A conversão de valores é feita de forma semelhante à de outras unidades de medida.



Apresentam-se a seguir alguns exemplos de conversão.

1) 1,2A é o mesmo que 1200mA. Veja porque:

kA			A			mA			µA					nA
					1	2								

kA			A			mA			µA					nA
					1	2	0	0						

2) 15µA é o mesmo que 0,015mA. Veja porque:

kA			A			mA			µA					nA
										1	5			

kA			A			mA			µA					nA
								0	0	1	5			

3) 350mA é o mesmo que 0,35A. Veja porque:

kA			A			mA			µA					nA
						3	5	0						

kA			A			mA			µA					nA
					0	3	5	0						

O instrumento utilizado para medir a intensidade de corrente é o amperímetro. Dependendo da intensidade da corrente, pode-se usar ainda:

- Miliamperímetros: para a medição de correntes da ordem de miliampères.
- Microamperímetros: para a medição de correntes da ordem de microampères.
- Nanoamperímetros: para a medição de correntes da ordem de nanoampères.
- Picoamperímetros: para a medição de correntes da ordem de picoampères.

CARGAS QUE SE MOVIMENTAM

Corrente elétrica é o movimento de cargas elétricas. Nos materiais sólidos, as cargas que se movimentam são os elétrons, enquanto que nos líquidos e gases o movimento pode ser de elétrons ou íons positivos.

CORRENTE CONTÍNUA

Quando o movimento de cargas elétricas (sejam elétrons ou íons) ocorre sempre em um sentido, a corrente elétrica é denominada de corrente contínua.

Corrente contínua é a corrente elétrica que flui sempre no mesmo sentido.

A corrente elétrica contínua é denominada normalmente de CC.

Resistência elétrica

Resistência elétrica é uma propriedade dos materiais que reflete o grau de oposição ao fluxo de corrente elétrica.

Resistência elétrica é a oposição que um material apresenta à passagem da corrente elétrica.

Todos os dispositivos elétricos e eletrônicos apresentam uma certa oposição à passagem da corrente elétrica.

ORIGEM DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA

A resistência que os materiais apresentam à passagem da corrente elétrica tem origem na sua estrutura atômica.

Para que a aplicação de uma **ddp** a um material origine uma corrente elétrica, é necessário que a estrutura deste material propicie a existência de cargas elétricas livres para movimentação.

Quando um material propicia a existência de um grande número de cargas livres, a corrente elétrica flui com facilidade através do material, conforme ilustrado na **Fig.4**. Neste caso, a resistência elétrica destes materiais é pequena.

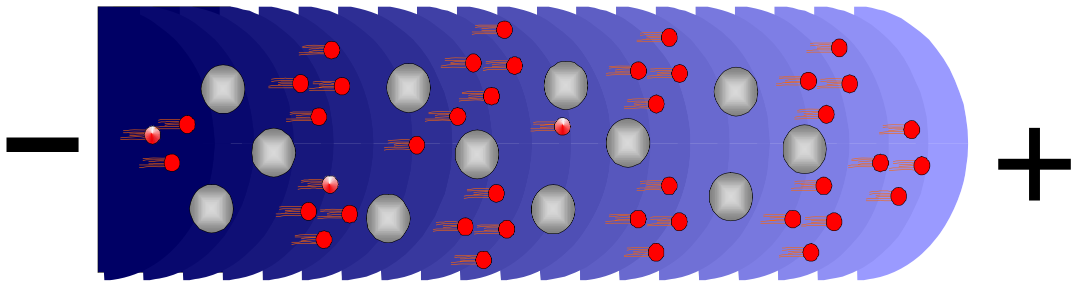


Fig.4 Movimento de cargas livres em um material de baixa resistência elétrica.

Por outro lado, nos materiais que propiciam a existência de um pequeno número de cargas livres, a corrente elétrica flui com dificuldade, como mostrado na **Fig.5**. A resistência elétrica destes materiais é grande.

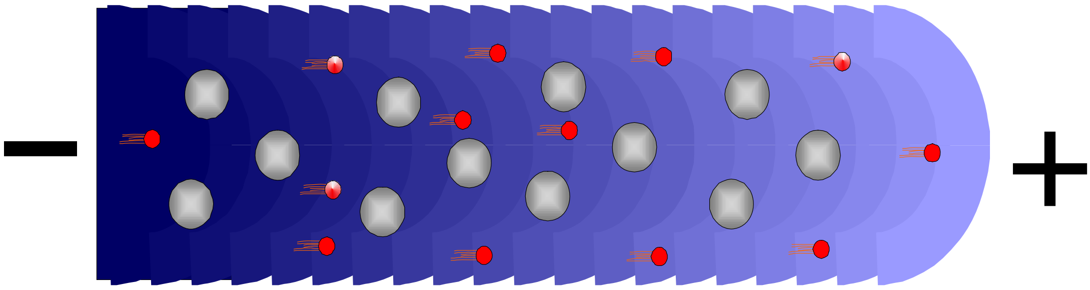


Fig.5 Movimento de cargas livres em um material de elevada resistência elétrica.

A resistência elétrica de um material depende da facilidade ou dificuldade com que este material libera cargas para a circulação.

UNIDADE DE MEDIDA DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA

A unidade de medida da resistência elétrica é o Ohm e é representada pelo símbolo Ω.

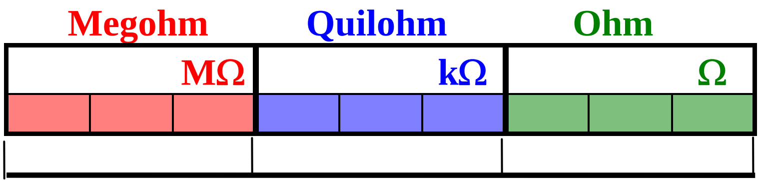
Ohm é a unidade de medida da resistência elétrica.

A unidade de medida da resistência elétrica tem múltiplos e submúltiplos. Entretanto, na prática, usam-se quase exclusivamente os múltiplos, que estão apresentados na **Tabela 2**.

Tabela 2 Múltiplos do ohm.

Denominação	Símbolo	Relação com a unidade
Megohm	MΩ	10^6Ω ou 1.000.000 Ω
Quilohm	kΩ	10^3Ω ou 1.000 Ω
Ohm	Ω	-

A conversão de valores obedece ao mesmo procedimento de outras unidades.



Posição da vírgula

Exemplos de conversão:

1) 120Ω é o mesmo que 0,12kΩ
2) 5,6kΩ é o mesmo que 5.600Ω
3) 2,7MΩ é o mesmo que 2.700kΩ
4) 390kΩ é o mesmo que 0,39MΩ
5) 470Ω é o mesmo que 0,00047MΩ
6) 680kΩ é o mesmo que 0,68MΩ

INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

O instrumento destinado à medição de resistência elétrica é denominado de ohmímetro.

Raramente se encontra um instrumento que seja unicamente ohmímetro. Em geral, as medições de resistência elétrica são realizadas através de um multímetro.

APLICAÇÕES DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA

O efeito causado pela resistência elétrica, que pode parecer inconveniente, encontra muitas aplicações práticas em eletricidade e eletrônica. Alguns exemplos práticos de aplicação da elevada resistência de alguns materiais são:

- Aquecimento: em chuveiros e ferros de passar.
- Iluminação: lâmpadas incandescentes.

MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

A resistência elétrica é medida através de um ohmímetro. Os multímetros, além de possibilitarem a medição de tensão, incorporam ainda um ohmímetro para medição de resistência elétrica, conforme ilustrado na **Fig.6.**

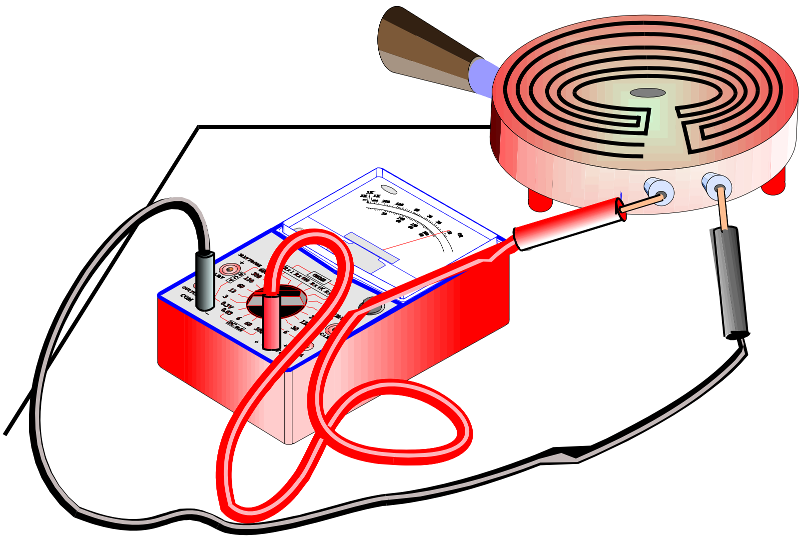


Fig.6 Exemplo de medição de resistência elétrica com um multímetro.

MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA COM O MULTÍMETRO

Os multímetros têm uma escala no painel e algumas posições da chave seletora destinadas à medição de resistência elétrica. A **Fig.7** mostra um multímetro, destacando a escala e as posições da chave seletora destinadas à medição de resistência.

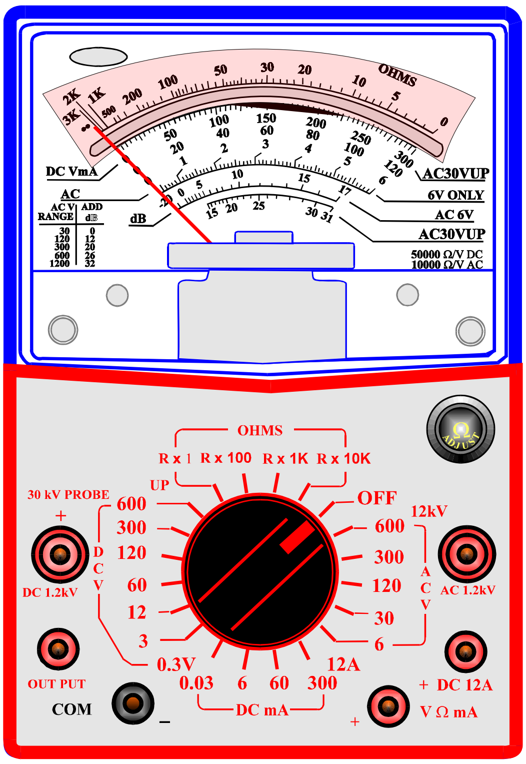


Fig.7 Multímetro com destaque na escala de medição de resistência.

Os bornes do multímetro onde são colocadas as pontas de prova para medição de resistência são os mesmos utilizados para as medições de tensão, conforme ilustrado na **Fig.8**.

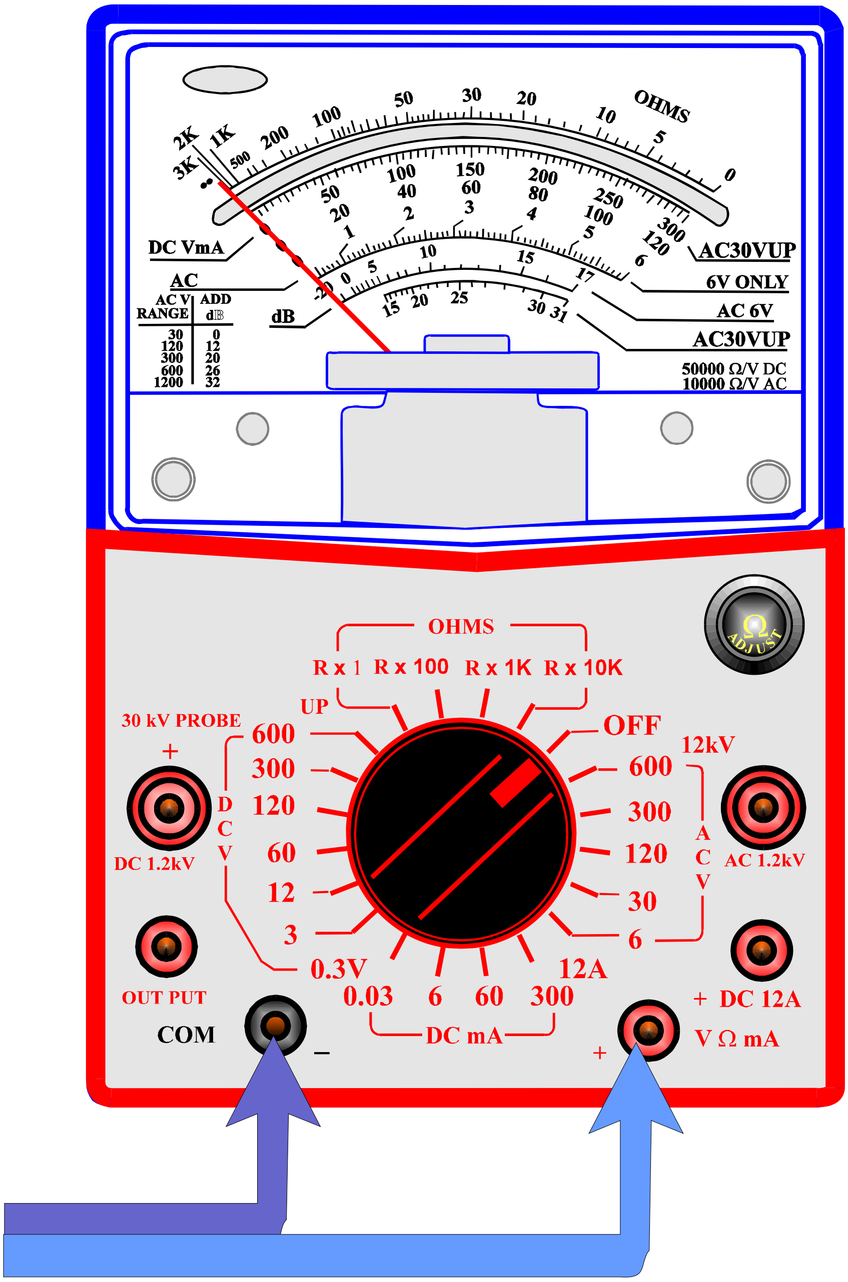


Fig.8 Bornes de conexão das pontas de prova do multímetro.

Em alguns multímetros pode existir um borne específico para a função de ohmímetro, indicado pelo símbolo Ω.

PROCEDIMENTOS PARA MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA COM O MULTÍMETRO

A medição de resistência elétrica com o multímetro requer uma seqüência de procedimentos para que o valor obtido seja confiável e o instrumento não seja danificado. Esta seqüência é:

- Desconectar a resistência que será medida de qualquer fonte de energia elétrica (pilhas, bateria ou tomada elétrica).
- Selecionar a escala ou fator multiplicativo.
- Ajustar o zero do instrumento.
- Conectar o instrumento à resistência.
- Interpretar a medida.

A seguir, serão discutidos individualmente cada um dos procedimentos.

DESCONEXÃO DE RESISTÊNCIA

Devido às características internas, os ohmímetros não podem ser utilizados para medir resistências que estejam em funcionamento. Se a medição é feita em uma resistência que está em funcionamento o ohmímetro pode ser danificado.

O ohmímetro deve ser usado apenas para medir resistências que não estejam energizadas.

Para medir, por exemplo, a resistência de um ferro de passar roupas, deve-se desconectá-lo da tomada elétrica.

SELEÇÃO DA ESCALA OU FATOR MULTIPLICATIVO

A chave seletora dos multímetros, em geral, tem 3 ou 4 posições para medição de resistência, conforme ilustrado na **Fig.9**.

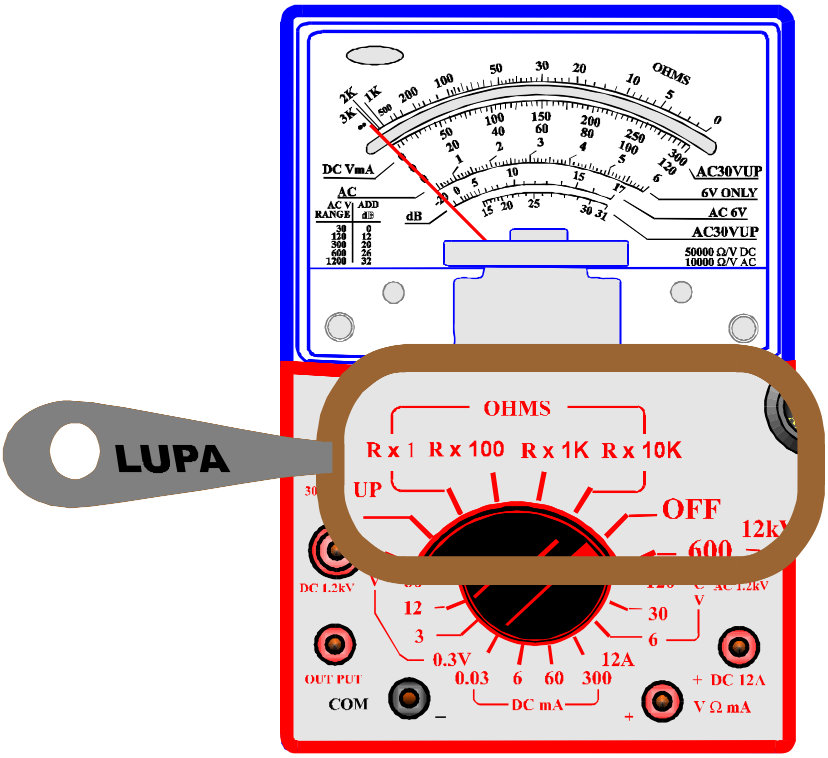


Fig.9 Posição da chave seletora para a medição de resistência.

Quando o valor a ser medido é completamente desconhecido, pode-se iniciar selecionando-se a escala ×1 (ou R × 1).

AJUSTE DO ZERO

Para medição de resistência, o multímetro utiliza uma fonte de energia interna (pilhas). Estas pilhas ficam alojadas no interior do multímetro.

Como estas pilhas sofrem um desgaste com o passar do tempo, as medições podem ser prejudicadas.

Para solucionar este problema, os ohmímetros dispõem de um controle denominado de AJUSTE DO ZERO que permite a compensação do desgaste destas fontes de energia através de um ajuste.

Este ajuste é feito através de um controle que está colocado no painel frontal do multímetro, conforme ilustrado na **Fig.10**.

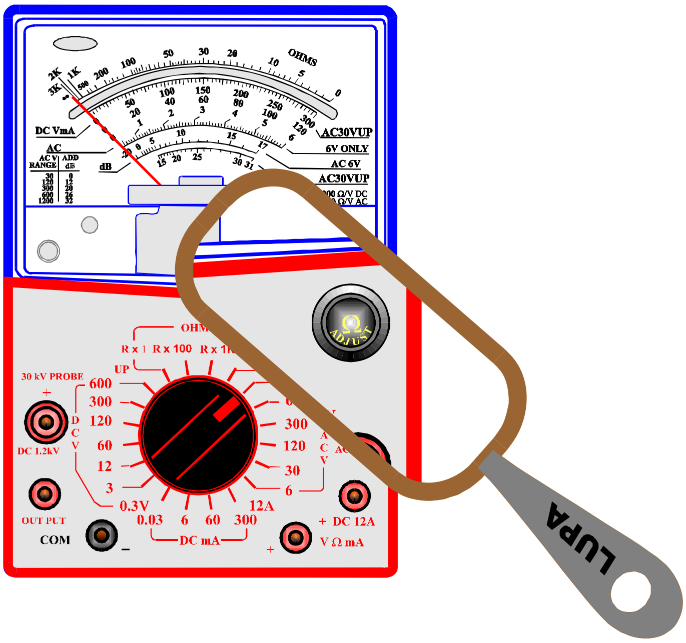


Fig.10 Controle do ajuste do zero de um multímetro.

Para ajustar o zero do instrumento, deve-se unir as pontas de prova e atuar no controle de ajuste até que o ponteiro se situe exatamente sobre o "0" da escala de Ohms, conforme ilustrado na **Fig.11.**

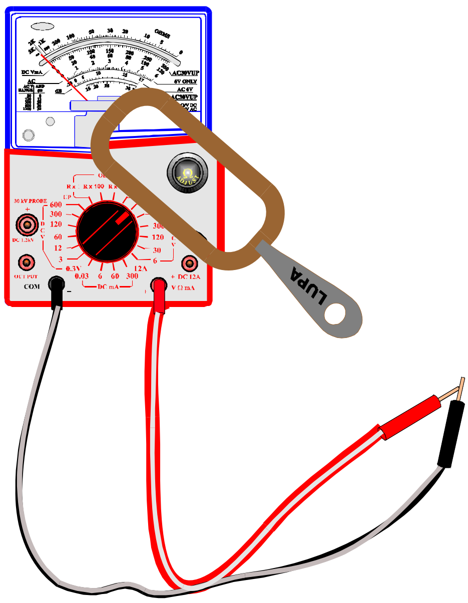


Fig.11 Procedimento para o ajuste do zero de um multímetro.

As pontas de prova devem permanecer curto-circuitadas apenas o tempo suficiente para a realização do ajuste, evitando o desgaste das pilhas do instrumento. O ajuste do zero deve ser conferido sempre que se executar uma troca de posição na chave seletora, como por exemplo, de R × 1 para R × 10.

É necessário ajustar o zero do instrumento cada vez que posicioná-lo para leitura de resistência e também a cada troca de escala efetuada.

O botão de ajuste do zero tem influência apenas nas medições de resistência não interferindo, portanto, nas demais grandezas medidas.

Uma medição de resistência efetuada sem que o zero tenha sido ajustado indicará um valor incorreto.

CONEXÃO DO INSTRUMENTO À RESISTÊNCIA

Após a seleção da escala de resistência e o ajuste do zero, as pontas de prova são conectadas sobre a resistência que se deseja medir, conforme ilustrado na **Fig.12**.

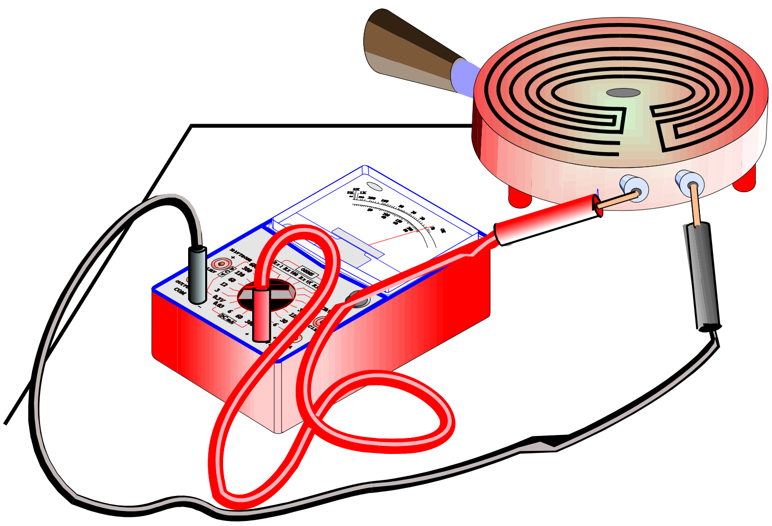


Fig.12 Exemplo de medição de uma resistência.

A ordem de colocação das pontas de prova não influencia no valor indicado pelo instrumento, conforme ilustrado nas **Fig.13**.



Fig.13 Outro exemplo de medição de resistência .

INTERPRETAÇÃO DA LEITURA

A interpretação da indicação do ohmímetro para determinar o valor ôhmico de uma resistência é muito simples, uma vez que os multímetros têm apenas uma escala para resistência. Realiza-se a leitura da indicação do ponteiro na escala e multiplica-se pelo fator indicado pela chave seletora (× l, × 10...).

A **Fig.14** mostra uma leitura do valor ôhmico de uma resistência de ferro de passar roupa com o multímetro.

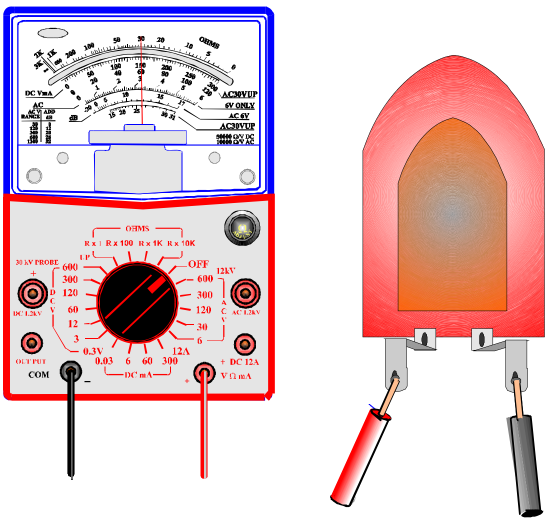


Fig.14 Medição da resistência de um ferro de passar roupa.

Sempre que possível, deve-se posicionar a chave seletora de forma que, ao medir a resistência, o ponteiro indicador se situe na região central da escala, como mostrado na **Fig.15**.

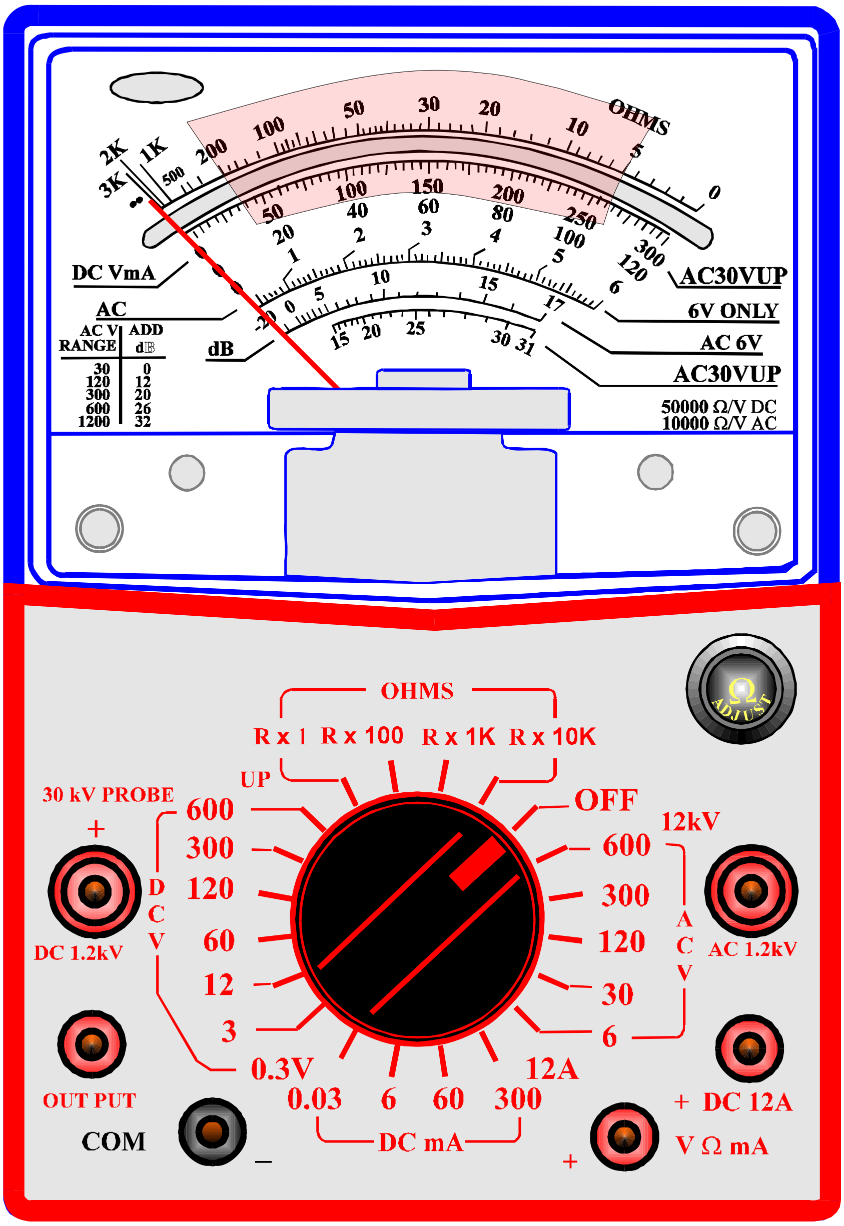


Fig.15 Indicação da posição central da escala.

Na extremidade direita e, principalmente, na extremidade esquerda, as leituras da escala não são muito precisas.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. O que é corrente elétrica e qual a unidade desta grandeza ?
2. O que se entende por corrente contínua ?
3. O que é resistência elétrica e qual a sua unidade ?

BIBLIOGRAFIA

LANG, JOHANNES G. **Corrente, tensão, resistência** : EP 02 [Strom, - Spannung - Widerstand] Traduzido e adaptado pelo Setor de Divulgação Tecnológica, Siemens. 2.ª ed. São Paulo, Siemens/Edgard Blücher, 1977, 73p.

SENAI/Departamento Nacional. **Grandezas elétricas**. Rio de Janeiro, Divisão de Ensino e Treinamento, 1980, 65p. (Módulo Instrucional: Eletricidade-Eletrotécnica, 2).

VAN VALKENBURGH, NOOGER & NEVILLE. **Eletricidade básica**. 15.ª ed. São Paulo, Freitas Bastos, 1970. v.1

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

A harmonia da atividade industrial com o meio ambiente é um dos objetivos do *SENAI*.

Introdução

A eletricidade é empregada das mais diversas formas pelo homem. A partir da energia elétrica, movimentam-se motores, acendem-se lâmpadas, produz-se calor etc. Entretanto, embora os efeitos sejam os mais diversos, todas as aplicações da eletricidade têm um ponto comum: implicam na existência de um circuito elétrico.

Este fascículo, que tratará dos materiais e das particularidades do circuito elétrico, foi elaborado visando a capacitá-lo a reconhecer um circuito elétrico, identificando os seus componentes e representando-os através de símbolos.

Lembre-se de que o circuito elétrico é indispensável para que a energia elétrica possa ser utilizada. Conhecer e compreender as suas características é fundamental para os estudos que se seguem a este.

Para ter sucesso no desenvolvimento do conteúdo e atividades deste fascículo, o leitor já deverá ter conhecimentos relativos a:

- Estrutura da matéria.
- Corrente e resistência elétrica.

Materiais condutores e isolantes

Os materiais são denominados de condutores quando permitem a passagem da corrente elétrica e de isolantes quando não permitem a passagem da corrente elétrica, conforme ilustrado na **Fig.1**.

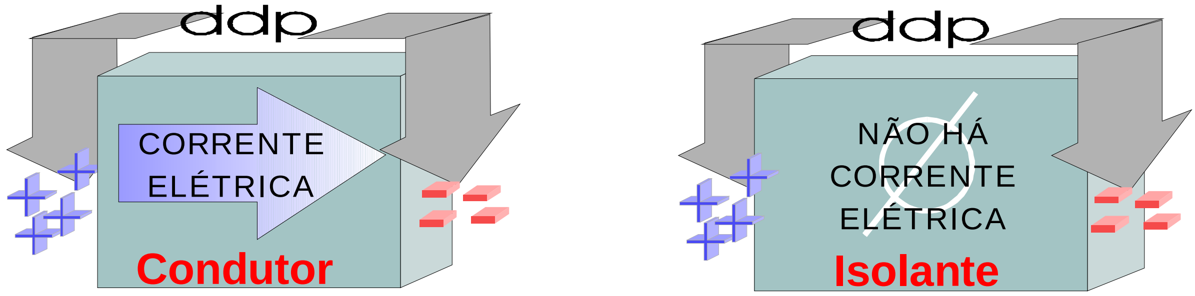


Fig.1 Efeitos da ddp em condutores e isolantes.

Os materiais condutores e isolantes são empregados em todos os dispositivos e equipamentos elétricos e eletrônicos.

MATERIAIS CONDUTORES

Os materiais condutores se caracterizam por permitir a existência de corrente elétrica toda vez que se aplica uma ddp entre seus extremos, conforme ilustrado na **Fig.2**.

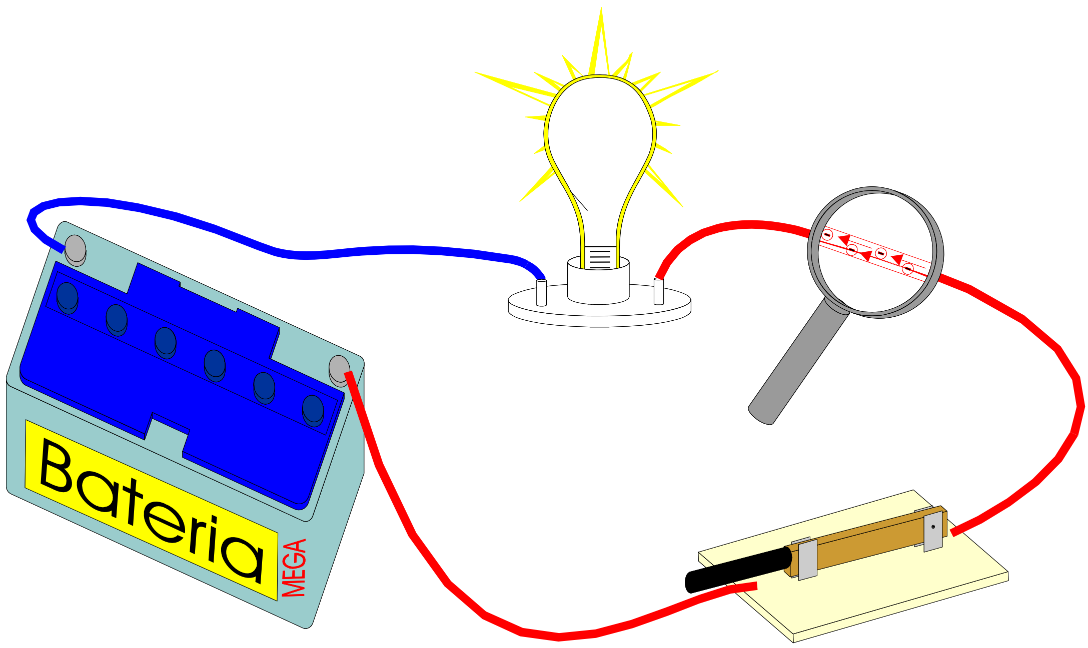


Fig.2 ddp fornecido pela bateria.

Existem materiais sólidos, líquidos e gasosos que são condutores elétricos. Entretanto, na área da eletricidade e eletrônica, os materiais sólidos são os mais importantes. Nos materiais sólidos, as cargas elétricas que se movimentam são os elétrons, como pode ser visto na **Fig.3**.

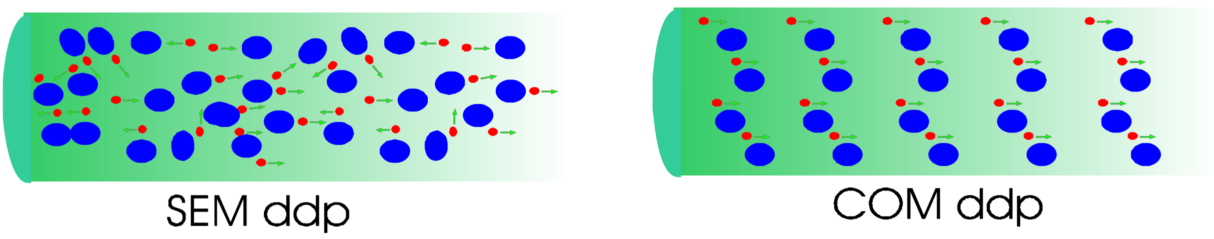


Fig.3 Movimento dos eletrons com e sem ddp.

Os elétrons que se movimentam no interior dos materiais sólidos, formando a corrente elétrica, são denominados de elétrons livres. Para que um material sólido seja condutor de eletricidade, é necessário que este material possua um grande número de elétrons livres.

Os condutores possuem um grande número de elétrons livres.

Quanto mais elétrons livres existirem em um material, melhor condutor de corrente elétrica ele será.

Os metais são os materiais que melhor conduzem a corrente elétrica porque os átomos da sua estrutura possuem um pequeno número de elétrons na camada externa (até 3 elétrons).

Esses elétrons se desprendem facilmente porque estão fracamente ligados ao número de átomos, tornando-se elétrons livres, conforme ilustrado na **Fig**.**4**.

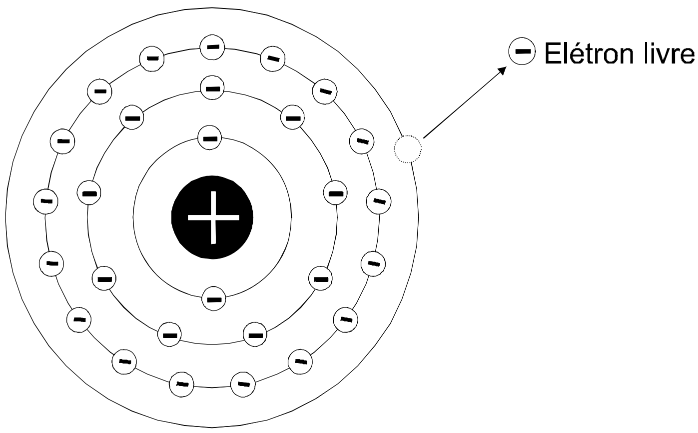


Fig.4 Fuga de um eletron.

Os átomos de cobre, que formam a estrutura atômica do "metal cobre", têm 29 elétrons, dos quais apenas 1 está na última camada. Este elétron se desprende do núcleo, vagando livre no interior do material.

A mobilidade dos elétrons da última camada energética do cobre é tal que a sua estrutura química se compõe de um grande número de núcleos fixos rodeados por elétrons livres que se movimentam intensamente de um núcleo para outro, conforme mostrado na **Fig**.**5**.

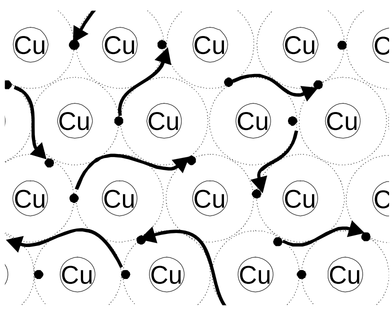


Fig.5 Estrutura do cobre.

A grande liberdade de movimentação dos elétrons no interior da estrutura química do cobre dá a este material a característica de boa condutividade elétrica.

Os materiais condutores podem ser classificados segundo a resistência que apresentam. Os melhores condutores (chamados de bons condutores) são os que apresentam menor resistência elétrica.

Bons condutores são materiais que têm baixa resistência elétrica.

A **Tabela 1** mostra a classificação de alguns materiais condutores, a partir da prata, em ordem decrescente de condutividade elétrica.

Tabela 1 Classificação de alguns materiais condutores em ordem decrescente de condutividade elétrica

Prata	*Cobre*	*Alumínio*	*Constantan*	*Níquel-cromo*

Eliminando a prata, que é um metal precioso, o cobre é o melhor condutor elétrico sendo muito utilizado para a fabricação de condutores para instalações elétricas.

MATERIAIS ISOLANTES

Os materiais classificados de isolantes são os que apresentam grande oposição à circulação de corrente elétrica no interior da sua estrutura.

A grande oposição à circulação de corrente nos materiais isolantes se deve ao fato de que a sua estrutura atômica não propicia a existência de elétrons livres.

Nos materiais isolantes, os elétrons dos átomos que compõem a estrutura química são fortemente ligados aos seus núcleos, dificilmente sendo liberados para a circulação.

Os materiais isolantes têm poucos elétrons livres.

Os materiais isolantes têm a sua estrutura atômica composta por átomos que têm 5 ou mais elétrons na última camada energética, conforme ilustrado na **Fig.6**.

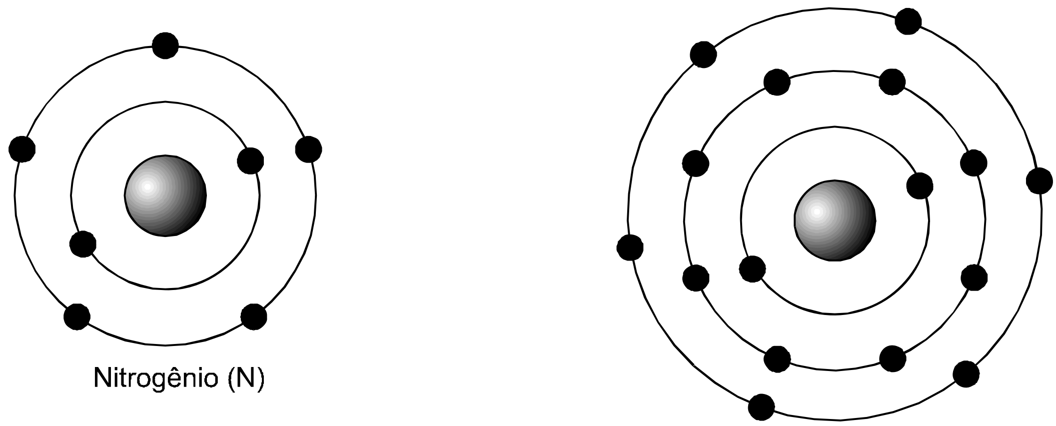


Fig.6 Estruturas atômicas do Nitrogênio e do Enxofre.

Em condições anormais, um material isolante pode tornar-se condutor. Este fenômeno, denominado **ruptura dielétrica**, ocorre quando a quantidade de energia entregue ao material é tão elevada que os elétrons (normalmente presos aos núcleos dos átomos) são arrancados das órbitas, provocando a circulação de corrente.

Ruptura dielétrica é o nome dado ao fenômeno pelo qual uma grande quantidade de energia transforma um material normalmente isolante em condutor.

A formação de faíscas no desligamento de um interruptor elétrico é um exemplo típico de **ruptura dielétrica**. A tensão elevada existente entre os contatos no momento da abertura fornece uma grande quantidade de energia que provoca a ruptura dielétrica do ar, propiciando a formação da faísca.

GRÁFICO ENERGÉTICO DOS MATERIAIS

A quantidade de energia necessária para um átomo liberar elétrons, tornando o material condutor, pode ser representada graficamente.

Nos materiais condutores, os elétrons da camada de valência estão fracamente ligados ao núcleo. Com uma pequena adição de energia, esses elétrons se liberam da banda de valência (camada externa) passando para a banda de condução onde se movimentam livremente (elétrons livres), conforme ilustrado na **Fig.7**.

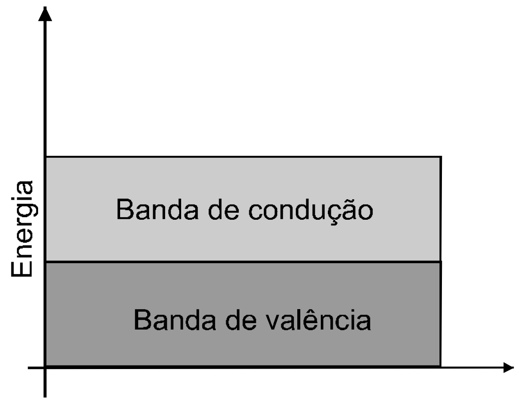


Fig.7 Bandas de Energia.

Os elétrons se movimentam livremente nos metais quando estão na banda de condução.

Nos materiais isolantes, a energia necessária para "arrancar" os elétrons da camada de valência é muito grande porque estes elétrons estão fortemente ligados ao núcleo.

O gráfico das bandas de energia dos materiais isolantes da **Fig.8** mostra, através da banda proibida, a grande quantidade de energia necessária para que um elétron passe da banda de valência para a de condução, rompendo, desta forma a capacidade de isolação do material.

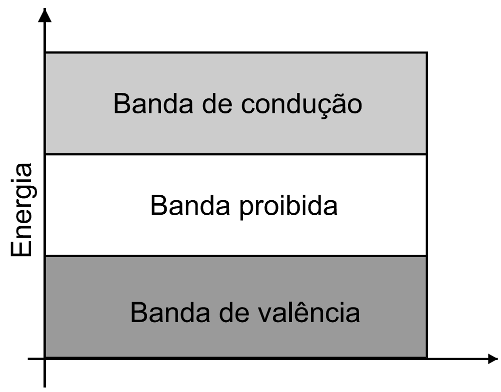


Fig.8 Bandas de Energia e banda proibida.

Circuito elétrico

Circuito elétrico é um caminho fechado por onde pode circular a corrente elétrica, como mostrado na **Fig.9**.

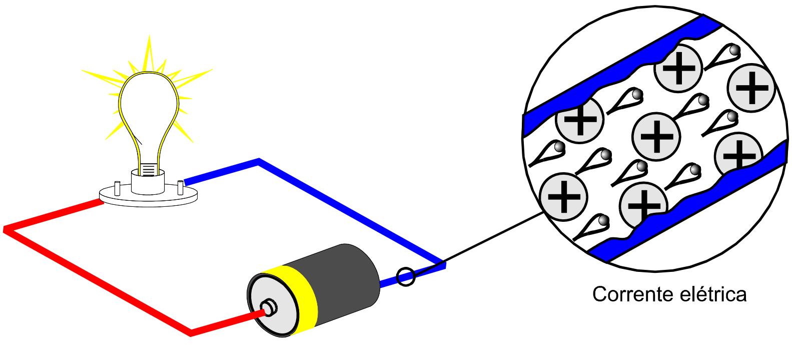


Fig.9 Exemplo de circuito elétrico.

Os circuitos elétricos podem assumir as mais diversas formas, com o objetivo de produzir os efeitos desejados, tais como: luz, som, calor e movimento.

COMPONENTES DO CIRCUITO ELÉTRICO

O circuito elétrico mais simples que se pode "realizar" é constituído de três componentes:

- Fonte geradora.
- Carga.
- Condutores.

FONTE GERADORA

Todo circuito elétrico necessita de uma fonte geradora que forneça um valor de tensão necessário para a existência de corrente elétrica.

CARGA

A carga (também denominada de “consumidor” ou “ receptor” de energia elétrica) é o componente do circuito elétrico que transforma a energia elétrica fornecida pela fonte geradora em outro tipo de energia (mecânica, luminosa, térmica etc).

As cargas são objetivo fim de um circuito. Os circuitos elétricos são constituídos visando o funcionamento da carga. São exemplos de carga :

- Lâmpada: transforma energia elétrica em luminosa (e térmica, pois também produz calor).
- Motor: transforma energia elétrica em mecânica (movimento de um eixo).
- Rádio: transforma energia elétrica em sonora.

Um circuito elétrico pode ter um ou mais consumidores.

CONDUTORES

Constituem o elo de ligação entre a fonte geradora e a carga. São utilizados como meio de transporte para a corrente elétrica.

Uma lâmpada, ligada através de condutores a uma pilha, é um exemplo característico de circuito elétrico simples, formado por três componentes, conforme ilustrado na **Fig.10**.

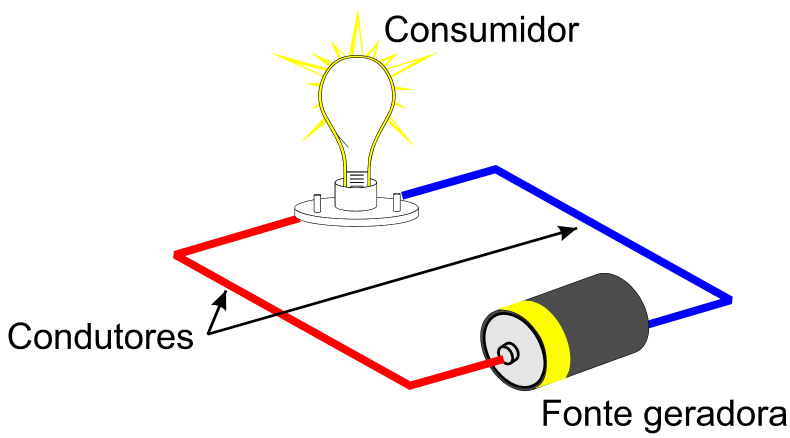


Fig.10 Circuito elétrico simples.

A lâmpada tem no seu interior uma resistência, chamada de filamento, que se torna incandescente quando percorrida por uma corrente elétrica, gerando luz.

A **Fig.11** mostra uma lâmpada incandescente, com as partes indicadas. O filamento recebe a tensão através dos terminais de ligação.

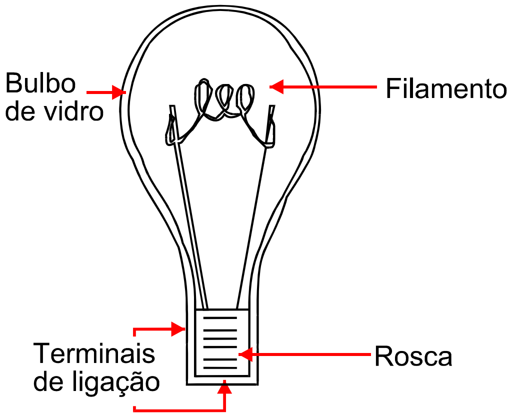


Fig.11 Elementos de uma lâmpada.

Quando a lâmpada é conectada à pilha por meio dos condutores, forma-se um circuito elétrico. Os elétrons em excesso no pólo negativo da pilha se movimentam através do condutor e do filamento da lâmpada em direção ao pólo positivo da pilha, como pode ser visto na **Fig.12**.

A **Fig.12** ilustra o movimento dos elétrons livres saindo do pólo negativo, passando pela lâmpada e dirigindo-se ao pólo positivo.

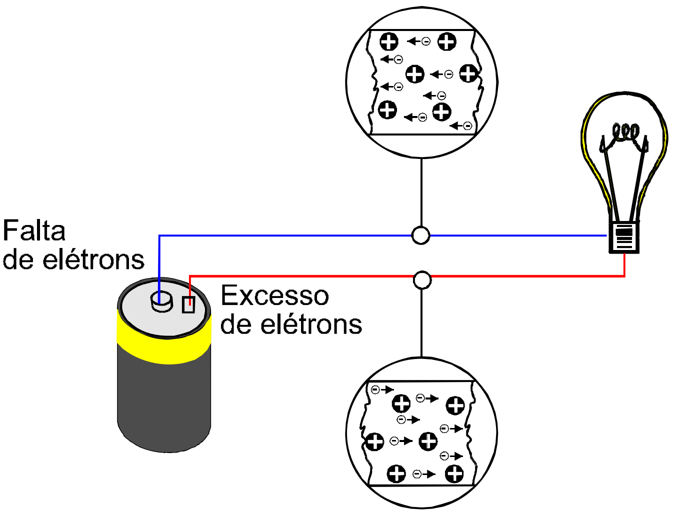


Fig.12 Movimento de elétrons em um circuito simples.

Enquanto a pilha tiver condições de manter um excesso de elétrons no pólo negativo e uma falta de elétrons no pólo positivo, haverá corrente elétrica no circuito e a lâmpada se manterá acesa.

SIMBOLOGIA DOS COMPONENTES DE UM CIRCUITO

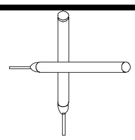
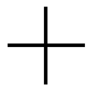
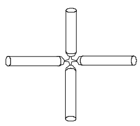
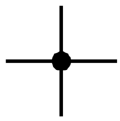
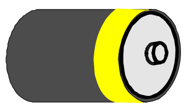
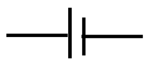
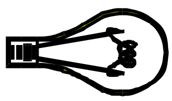
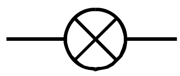
Seria muito inconveniente, a cada vez que se necessitasse desenhar um circuito elétrico, ter que reproduzir os componentes na sua forma real.

Por esta razão foi criada uma simbologia, de forma que cada componente é representado por um símbolo toda vez que se precisar desenhar um circuito elétrico.

Símbolo é a representação gráfica de um componente.

A **Tabela 2** mostra alguns símbolos utilizados e os respectivos componentes.

Tabela 2 Simbologia de uma frequente em eletricidade

DESIGNAÇÃO	FIGURA	SÍMBOLO
Condutor		
Cruzamento sem conexão		
Cruzamento com conexão		
Fonte, gerador ou bateria		
Lâmpada		

A representação gráfica de um circuito elétrico através da simbologia é denominada de “esquema” ou “ diagrama elétrico”.

Esquema ou diagrama é a apresentação gráfica de um circuito elétrico empregando a simbologia.

Empregando a simbologia, o circuito elétrico da **Fig.13** formado pela lâmpada, condutores e pilha se representa conforme o esquema da **Fig.14**.

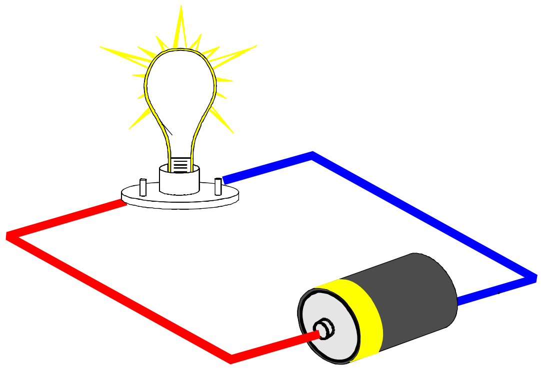


Fig.13 O circuito elétrico simples.

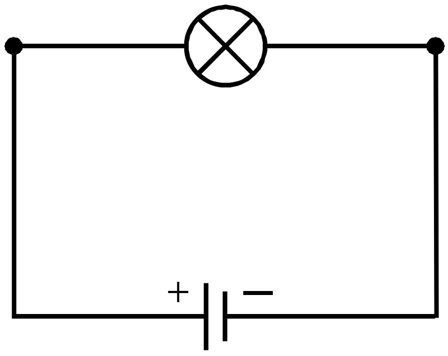


Fig.14 Esquema ou diagrama.

Quando se necessita representar a existência de uma corrente elétrica em um diagrama, utiliza-se normalmente uma seta acompanhada pela letra I, como pode ser visto na **Fig.15**.

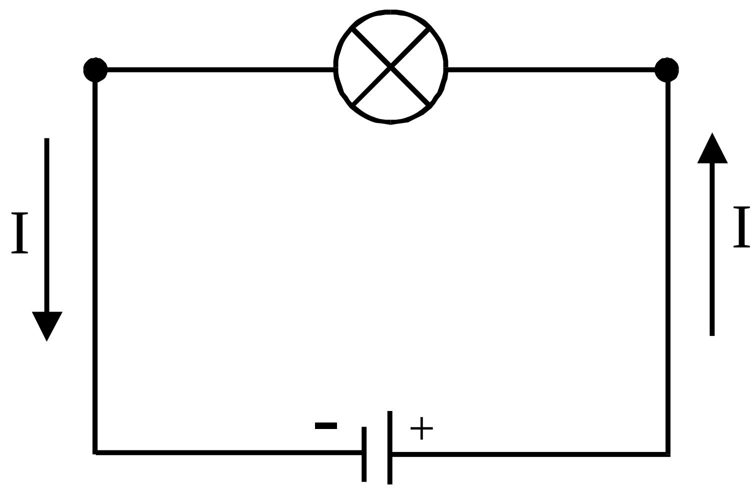


Fig.15 Representação da corrente *I*.

O INTERRUPTOR EM UM CIRCUITO ELÉTRICO

Os circuitos elétricos possuem normalmente um componente adicional além da fonte geradora, consumidor(es) e condutores. Este componente é o INTERRUPTOR ou CHAVE. Os interruptores ou chaves são incluídos nos circuitos elétricos com a função de comandar o seu funcionamento, conforme ilustrado nas **Figs.16** e **17**.

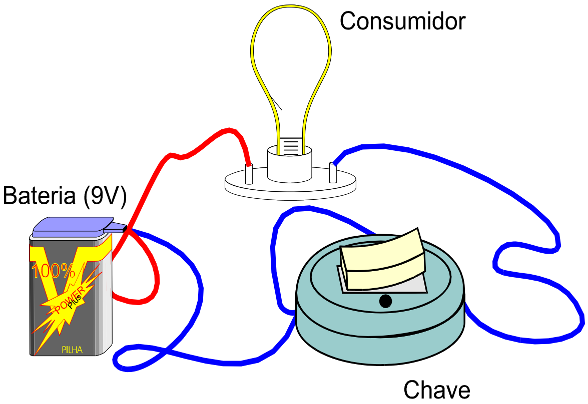


Fig.16 Chave desligada.

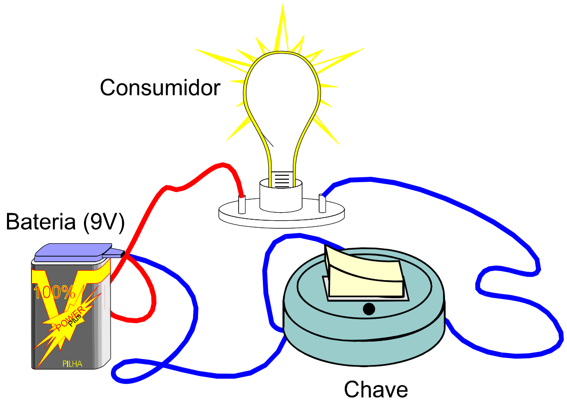


Fig.17 Chave ligada.

Os interruptores ou chaves podem ter as mais diversas formas, mas cumprem sempre a função de ligar ou desligar o circuito, como pode ser visto na **Fig.18**.

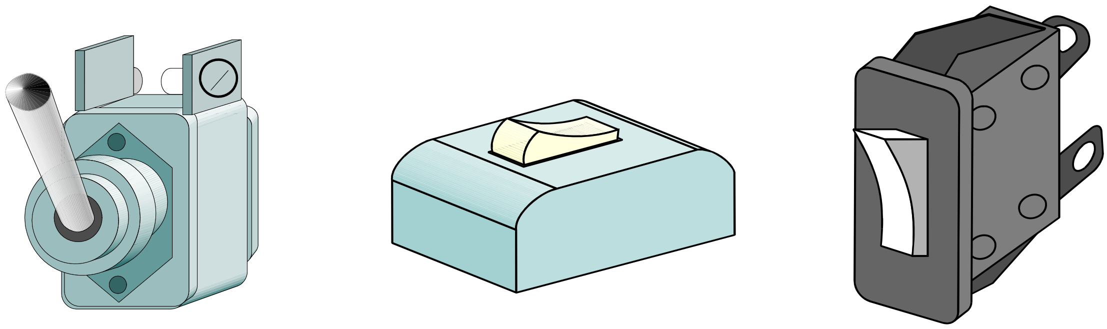


Fig.18 Diversos tipos de chave ou interruptor.

Nos esquemas, os interruptores e chaves são representados pelo símbolo da **Fig.19**.

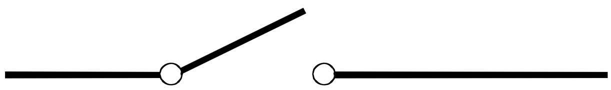


Fig.19 Representação simbólica de chaves e interruptores.

A **Fig.20** mostra o esquema do circuito elétrico da **Fig.16** acrescido do interruptor.

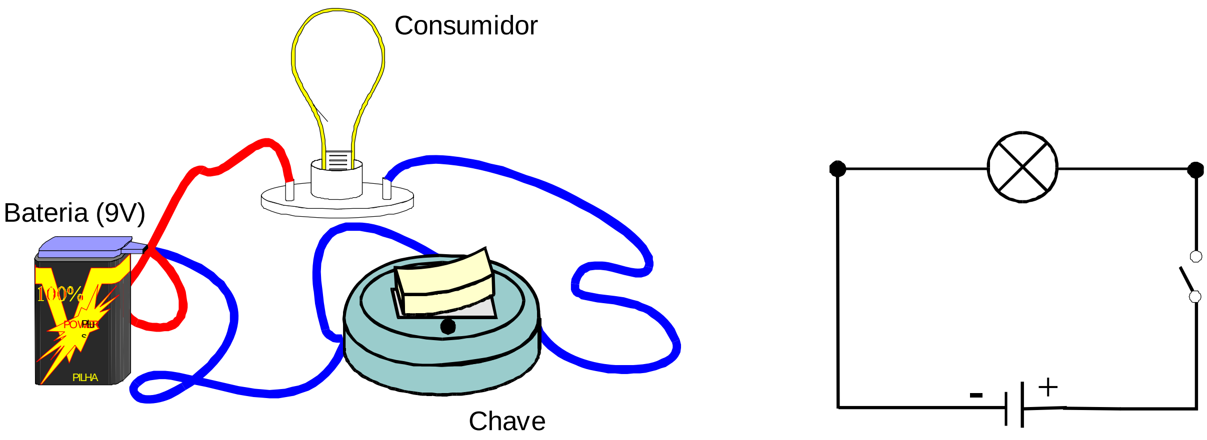


Fig.20 Representação de uma chave na condição "desligado".

Na posição “desligado” ou “ aberto”, o interruptor provoca uma abertura em um dos condutores. Nesta condição o circuito elétrico não corresponde a um “caminho fechado” porque um dos pólos da pilha (positivo) está desconectado do circuito.

Na posição ”ligado” ou “fechado”, o interruptor tem os seus contatos fechados, tornando-se um condutor de corrente contínua. Nesta condição, o circuito é novamente “caminho fechado” onde circula corrente elétrica, conforme ilustrado na **Fig.21**.

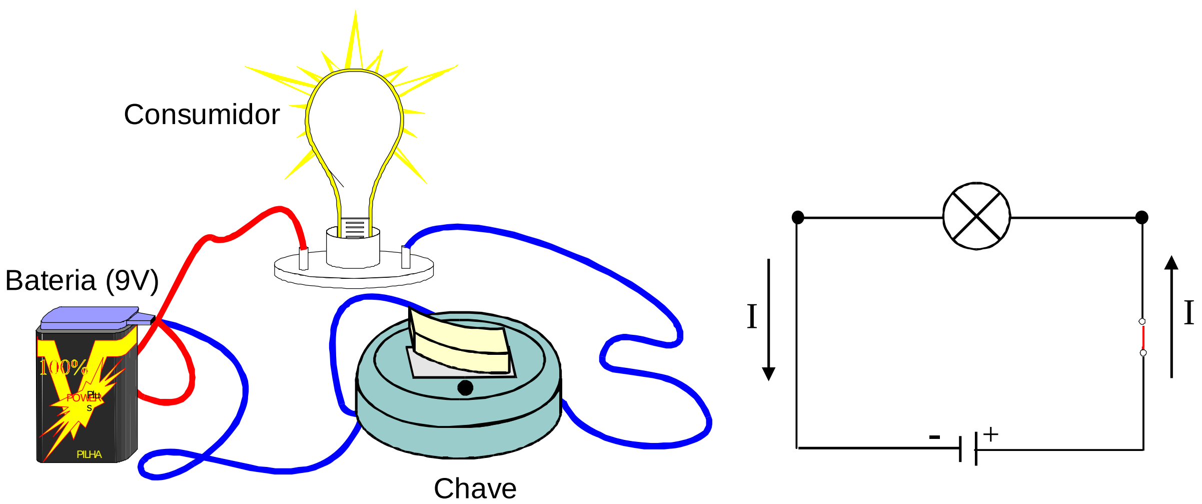


Fig.21 Representação de uma chave na condição "ligado".

O SENTIDO DA CORRENTE EM UM CIRCUITO ELÉTRICO

Antes que se compreendesse de forma mais científica a natureza do fluxo de elétrons, já se utilizava a eletricidade para a iluminação, motores e outras aplicações. Naquela época, estabeleceu-se por convenção, que a corrente elétrica se constituía de um movimento de cargas elétricas que fluía do pólo positivo para o pólo negativo da fonte geradora. Este sentido de circulação do mais (+) para o menos (-) foi denominado de **sentido convencional da corrente**.

No sentido convencional da corrente, as cargas elétricas se movimentam do pólo positivo para o pólo negativo.

Com o aprofundamento e melhoramento dos recursos científicos, verificou-se, mais tarde, que nos condutores sólidos a corrente elétrica se constituía de elétrons em movimento do pólo negativo para o pólo positivo. Este sentido de circulação foi denominado de **sentido eletrônico da corrente**.

No sentido eletrônico da corrente, as cargas elétricas se movimentam do pólo negativo para o positivo.

O sentido que se adota como referência para o estudo dos fenômenos elétricos (eletrônico ou convencional) não interfere nos resultados que se obtém, razão pela qual ainda hoje se encontram defensores para cada um dos sentidos.

Tendo em vista que toda simbologia de componentes eletrônicos foi desenvolvida a partir do **sentido convencional** da corrente elétrica (do mais para o menos), as informações relativas à Eletrônica destes fascículos utilizarão este sentido como referência.

O sentido da corrente utilizado neste material instrucional será o convencional: do positivo para o negativo.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. O que são materiais condutores ?

2. O que são materiais isolantes ?

3. O que se entende por ruptura dielétrica ?

4. Explique o sentido convencional da corrente.

BIBLIOGRAFIA

KOLLER, ALOIS. **O circuito elétrico**: EP 03 Der elektrische Stromkreis Trad. e adaptado pelo setor de Divulgação Tecnológica, Siemens. São Paulo, Siemens, 1975, 60pp.

SENAI: Departamento Nacional, **Circuito elétrico**. Rio de Janeiro, Divisão de Ensino e Treinamento, 1980, 49pp (Módulo Instrucional: Eletricidade - Eletrotécnica, 4).

VAN VALKENBURG, NOOGER & NEVILLE. **Eletricidade básica**. 15.ª ed. São Paulo, Freitas Bastos, 1970, v.l.

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

O cliente é a razão do nosso trabalho, a fim de inseri-lo em um novo contexto social de competitividade e empregabilidade.

Introdução

Os resistores são os componentes mais utilizados na maioria dos circuitos eletrônicos. Dificilmente se encontrará um equipamento eletrônico que não utilize resistores.

Este fascículo, que tratará dos resistores e código de cores, foi elaborado para capacitá-lo a identificar características elétricas e construtivas dos resistores, bem como interpretar valores de resistência expressos por código de cores.

Estude-o atentamente, pois as informações apresentadas serão utilizadas no dia a dia do aprendizado de eletrônica básica.

Para ter sucesso no desenvolvimento do conteúdo deste fascículo, o leitor já deverá ter conhecimentos relativos a:

- Corrente e resistência elétrica.

Resistores

Os resistores são componentes utilizados nos circuitos com a finalidade de limitar a corrente elétrica. A **Fig.1** mostra alguns resistores.

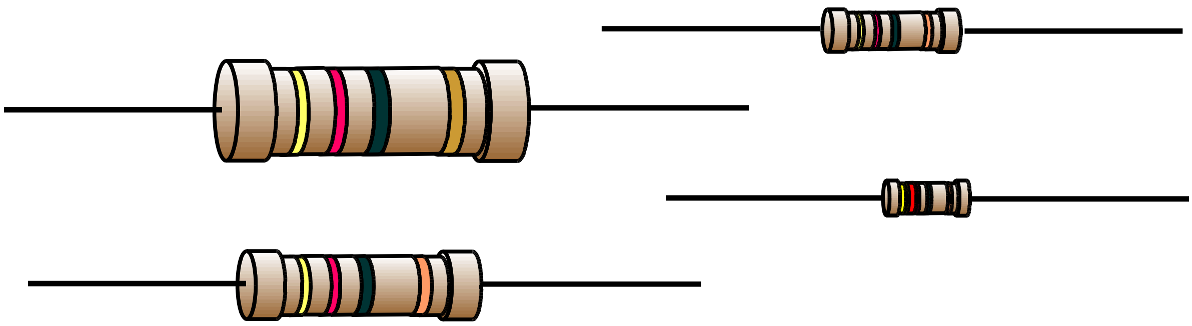


Fig.1 Resistores.

Pelo controle da corrente é possível reduzir ou dividir tensões.

CARACTERÍSTICAS DOS RESISTORES

Os resistores possuem características elétricas importantes. São elas:

- Resistência ôhmica.
- Percentual de tolerância.

RESISTÊNCIA ÔHMICA

É o valor específico de resistência do componente. Os resistores são fabricados em valores padronizados, estabelecidos por norma. Por exemplo: 120Ω, 560Ω, 1500Ω.

PERCENTUAL DE TOLERÂNCIA

Os resistores estão sujeitos a diferenças no seu valor que decorrem do processo de fabricação. Essas diferenças se situam em 5 faixas de percentual:

20% de tolerância
10% de tolerância
5% de tolerância
2% de tolerância
1% de tolerância

Os resistores com 20%, 10% e 5% de tolerância são considerados resistores comuns e os de 2% e 1% são resistores de precisão. Os resistores de precisão são usados apenas em circuitos onde os valores de resistência são críticos. O percentual de tolerância indica qual a variação de valor que o componente pode apresentar em relação ao valor padronizado. A diferença no valor pode ser para mais ou para menos do valor correto.

A **Tabela 1** apresenta alguns valores de resistores com o percentual de tolerância e os limites entre os quais deve situar-se o valor real do componente.

Tabela 1 Valor real de alguns resistores.

Valor nominal	Tolerância (%)	Valor real		
1.000Ω	10%	-10%	Min.	1.000 x 0,9 = 900
		+10%	Max.	1.000 x 1,1 = 1.100
560Ω	5%	-5%	Min.	560 x 0,95 = 532
		+5%	Max.	560 x 1,05 = 588
120Ω	1%	-1%	Min.	120 x 0,99 = 118,8
		+1%	Max.	120 x 1,01 = 121,2

A **Tabela 2** apresenta a padronização de valores para fabricação de resistores em tolerância de 5%.

Tabela 2 Série de valores E-24.

10	**11**	**12**	**13**	**15**	**16**	**18**	**20**	**22**	**24**	**27**	**30**
33	**36**	**39**	**43**	**47**	**51**	**56**	**62**	**68**	**75**	**82**	**91**

Encontram-se ainda resistores com os valores da **Tabela 2** multiplicados por 0,1 (por exemplo 1,1Ω), 10 (por exemplo 180Ω), 100 (por exemplo 2.700Ω), 1.000 (por exemplo 36kΩ), 10.000 (por exemplo 560kΩ) e 100.000 (por exemplo 9,1MΩ). Deste modo, os valores padronizados acrescidos das tolerâncias permitem que se obtenha qualquer valor de resistência desejada.

A **Tabela 3** mostra, por exemplo, os valores de resistores que podem ser encontrados quando se tomam apenas 3 valores consecutivos e alternados da **Tabela 2** (10, 12 e 15):

Tabela 3 Valores possíveis de resistores não padronizados.

Valor nominal	Tolerância	Valores possíveis
100Ω	10%	90Ω a 110Ω
120Ω	10%	108Ω a 132Ω
150Ω	10%	135Ω a 165Ω

SIMBOLOGIA

A **Fig.2** mostra os símbolos utilizados para representação dos resistores, sendo um deles o símbolo oficial que deve ser utilizado no Brasil, segundo a norma ABNT.



Fig.2 Símbolos utilizados para representar um resistor.

Nos diagramas, o valor do resistor aparece ao lado do símbolo ou no seu interior, como mostrado na **Fig.3**.

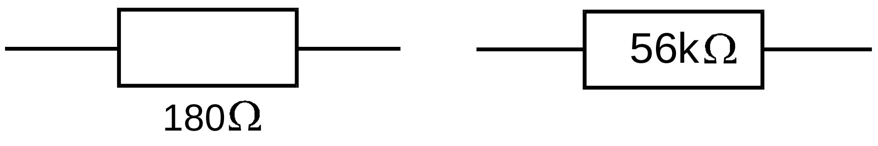


Fig.3 Indicação do valor do resistor.

TIPOS DE RESISTORES

Existem três tipos de resistores quanto à constituição:

- Resistores de filme de carbono.
- Resistores de carvão.
- Resistores de fio.

Cada um dos tipos tem, de acordo com sua constituição, características que o tornam mais adequados que os outros tipos em sua classe de aplicação. A seguir, são apresentados os processos básicos de fabricação e a aplicação do componente.

RESISTOR DE FILME DE CARBONO (BAIXA POTÊNCIA)

O resistor de filme de carbono, também conhecido como resistor de película, é constituído por um corpo cilíndrico de cerâmica que serve de base para a fabricação do componente, conforme ilustrado na **Fig.4**.



Fig.4 Cilindro de cerâmica usado na confecção de resistores de película.

Sobre o corpo é depositada uma fina camada em espiral de material resistivo (filme de carbono) que determina o valor ôhmico do resistor, como mostrado na **Fig.5**.

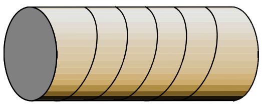


Fig.5 Filme de carbono em espiral.

Os terminais (lides de conexão) são colocados nas extremidades do corpo em contato com a camada de carbono.

Os terminais possibilitam a ligação do elemento ao circuito, conforme ilustrado na **Fig.6**.

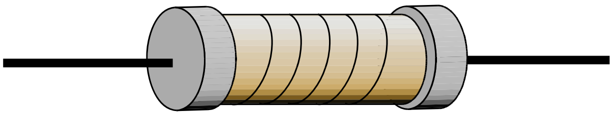


Fig.6 Fixação dos terminais do resistor.

O corpo do resistor pronto recebe um revestimento que dá acabamento na fabricação e isola o filme de carbono da ação da umidade.

A **Fig.7** mostra um resistor pronto, em corte, aparecendo a conexão dos terminais e o filme resistivo.

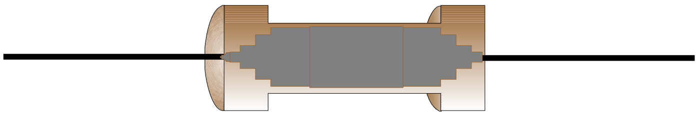


Fig.7 Representação de um resistor em corte.

As características fundamentais do resistor de filme de carbono são a precisão e a estabilidade do valor resistivo.

RESISTORES DE CARVÃO (MÉDIA POTÊNCIA)

O resistor de carvão é constituído por um corpo cilíndrico de porcelana. No interior da porcelana são comprimidas partículas de carvão que definem a resistência do componente, como mostrado na **Fig.8**.

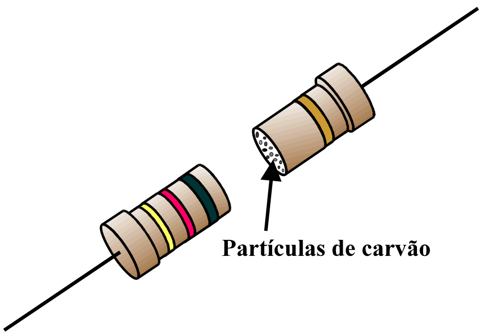


Fig.8 Resistor de carvão.

Com maior concentração de partículas de carvão, o valor resistivo do componente é reduzido. Apresentam tamanho físico reduzido e os valores de dissipação e resistência não são precisos. Podem ser usados em qualquer tipo de circuito.

RESISTORES DE FIO (MÉDIA - ALTA POTÊNCIA)

Constitui-se de um corpo de porcelana ou cerâmica que serve como base. Sobre o corpo é enrolado um fio especial (por exemplo, níquel-cromo) cujo comprimento e seção determinam o valor do resistor.

A **Fig.9** apresenta um resistor de fio em corte. Nela aparecem os terminais, o fio enrolado e a camada externa de proteção do resistor.

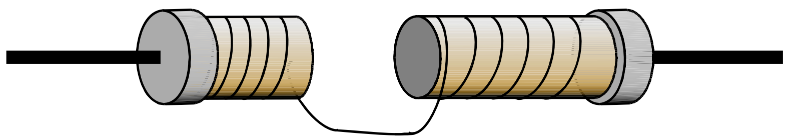


Fig.9 Resistor de fio.

O resistor de fio tem capacidade para trabalhar com maior valor de corrente. Este tipo de resistor produz normalmente uma grande quantidade de calor quando em funcionamento.

Para facilitar o resfriamento dos resistores que dissipam grandes quantidades de calor, o corpo de porcelana maciço é substituído por um tubo de porcelana, como pode ser visto na **Fig.10**.

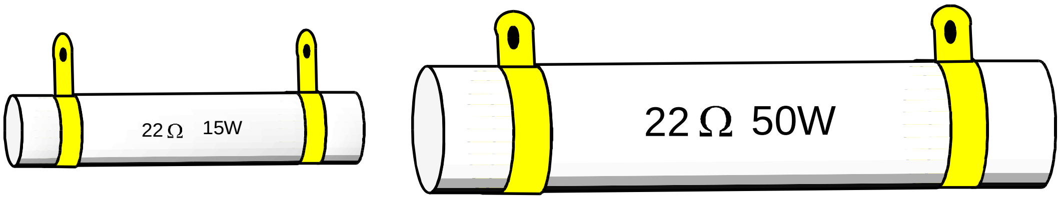


Fig.10 Resistores que dissipam muito calor.

Resistores que dissipam grande quantidade de calor são construídos sobre um tubo oco de porcelana para facilitar o resfriamento.

Código de cores para resistores

O valor ôhmico dos resistores e sua tolerância são impressos no corpo do componente através de anéis coloridos, conforme ilustrado na **Fig.11**.

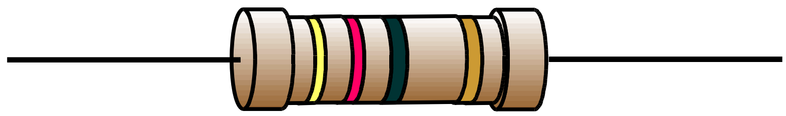


Fig.11 Anéis coloridos que indicam o valor ôhmico do resistor.

A disposição das cores em forma de anéis possibilita que o valor do componente possa ser lido de qualquer posição.

INTERPRETAÇÃO DO CÓDIGO

O código se compõe de três cores usadas para representar o valor ôhmico, e uma para representar o percentual de tolerância. Para a interpretação correta dos valores de resistência e tolerância do resistor, os anéis têm que ser lidos em uma seqüência correta.

O primeiro anel colorido a ser lido é aquele que está mais próximo da extremidade do componente. Seguem na ordem o 2.º, o 3.º e o 4.º anéis coloridos, conforme mostrado na **Fig.12**.

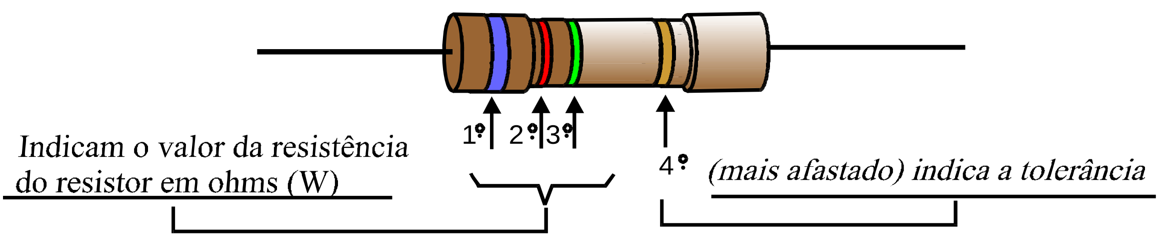


Fig.12 Posição e significado dos anéis coloridos.

Os três primeiros anéis coloridos (1.º, 2.º e 3.º) representam o valor do resistor. O 4.º anel representa o percentual de tolerância.

O primeiro anel colorido representa o primeiro número que formará o valor do resistor, como ilustrado na **Fig.13**.

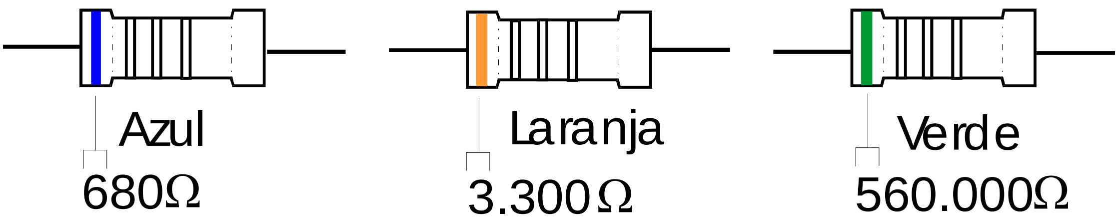


Fig.13 Primeiro anel indicando o primeiro algarismo do valor do resistor.

A cada número corresponde uma cor, como mostra a **Tabela 4**.

Tabela 4 Código de cores para resistores.

Preto	Marrom	Vermelho	Laranja	Amarelo	Verde	Azul	Violeta	Cinza	Branco
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

O segundo anel colorido representa o segundo número que forma o valor do resistor, como pode ser visto na **Fig.14**.

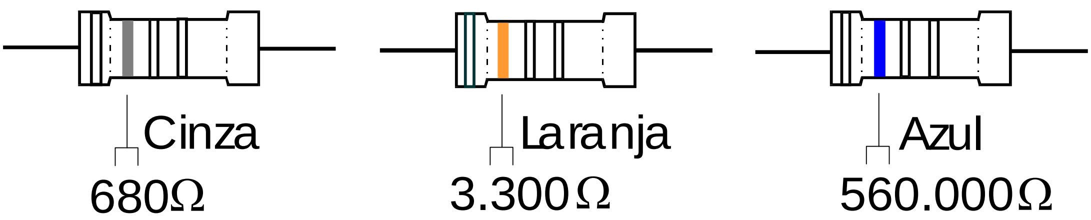


Fig.14 Segundo anel indicando o segundo algarismo do valor do resistor.

Para o segundo anel, as cores têm o mesmo significado do primeiro anel.

O terceiro anel representa o número de zeros que segue aos dois primeiros algarismos, sendo chamado de fator multiplicativo. A **Fig.15** mostra três exemplos.

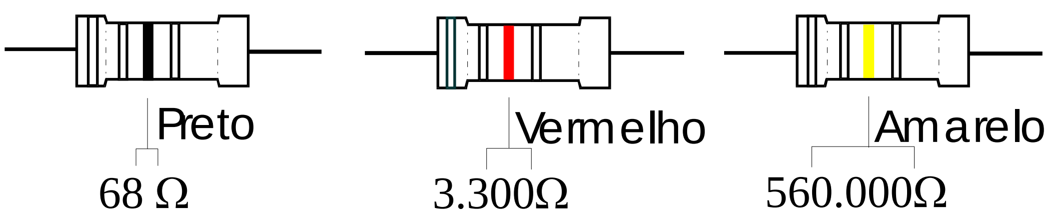


Fig.15 Terceiro anel indicando o fator multiplicador.

A cada número de zeros corresponde uma cor, como mostra a **Tabela 5**.

Tabela 5 Código de cores dos multiplicadores.

Preto	Marrom	Vermelho	Laranja	Amarelo	Verde	Azul
Nenhum zero	1 zero	2 zeros	3 zeros	4 zeros	5 zeros	6 zeros

As cores violeta, cinza e branco não são encontradas no 3.º anel por que os resistores padronizados não alcançam valores que necessitem de 7, 8 ou 9 zeros.

Os resistores usados como exemplo estão representados na **Fig.16**.

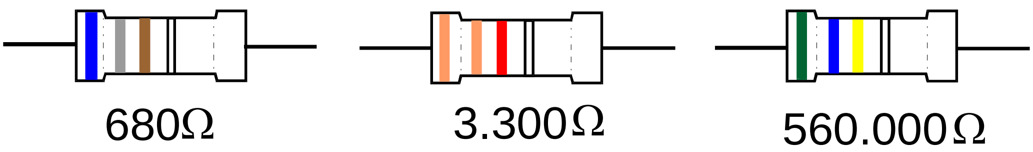


Fig.16 Resistores de 680Ω, 3.300Ω e 560.000Ω com código de cores.

O quarto anel colorido representa a tolerância do resistor. A cada percentual corresponde uma cor característica, como pode ser visto na **Tabela 6**.

Tabela 6 Código de cores relativo a tolerância.

Prateado	Dourado	Vermelho	Marrom
± 10%	± 5%	± 2%	± 1%

A ausência do quarto anel indica a tolerância de 20%.

Acrescendo-se uma tolerância de 10% aos valores dos resistores usados, temos como exemplo :

680Ω ± 10% Azul (6), cinza (8), marrom (1), prateado (± 10%)
3.300Ω ± 10% Laranja (3), laranja (3), vermelho (2), prateado (± 10%)
560.000Ω ± 10% Verde (5), azul (6), amarelo (4), prateado (± 10%)

RESISTORES DE 1Ω A 10Ω

Para representar resistores de 1 a 10Ω, o código de cores estabelece o uso da cor **dourado** no 3° anel. O dourado neste anel indica a existência da vírgula entre os dois primeiros números.

Seguem alguns exemplos:

1,8Ω ± 5%	Marrom (1), cinza (8), dourado, dourado (± 5%)
4,7Ω ± 10%	Amarelo (4), violeta (7), dourado, prateado (±10%)
8,2Ω ± 20%	Cinza (8), vermelho (2), dourado, sem cor (±20%)

RESISTORES ABAIXO DE 1Ω

Para representar resistores abaixo de 1Ω, o código de cores determina o uso do **prateado** no 3° anel. O prateado neste anel significa a existência de 0 antes dos dois primeiros números.

Seguem alguns exemplos:

0,39Ω ± 20%	Laranja (3), branco (9), prateado, sem cor (±20%)
0,15Ω ± 10%	Marrom (1), verde (5), prateado, prateado (±10%)

A **Tabela 7** a seguir apresenta o código de cores completo.

Tabela 7 Código de cores completo para resistores.

Cor	Dígitos significativos	Multiplicador	Tolerância
Preto	0	1	
Marrom	1	10	
Vermelho	2	100	
Laranja	3	1.000	
Amarelo	4	10.000	
Verde	5	100.000	
Azul	6	1.000.000	
Violeta	7	–	
Cinza	8	–	
Branco	9	–	
Ouro		0,1	±5%
Prata		0,01	± 10%
Sem cor			± 20%

RESISTORES DE 5 ANÉIS

Em algumas aplicações são necessários resistores com valores mais precisos que se situam entre os valores padronizados.

Estes resistores tem o seu valor impresso no corpo através de cinco anéis coloridos, conforme ilustrado na **Fig.17**.

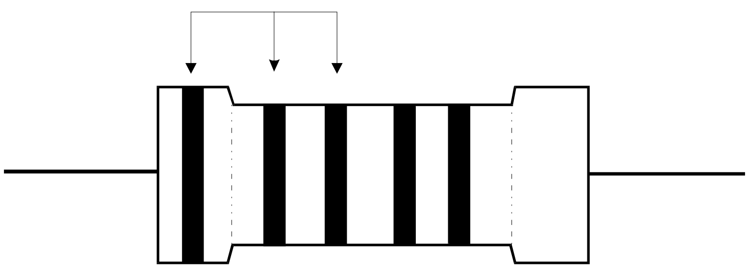


Fig.17 Resistor com cinco anéis.

Nestes resistores, os três primeiros anéis são dígitos significativos, o quarto anel representa o número de zeros (fator multiplicativo) e o quinto anel é a tolerância. A **Tabela 8** mostra o código de cores para estes tipos de resitores.

Tabela 8 Código de cores para resistores de cinco anéis.

Cor	Dígitos significativos	Multiplicador	Tolerância
Preto	0	1	
Marrom	1	10	± 0%
Vermelho	2	100	± 2%
Laranja	3	1.000	
Amarelo	4	10.000	
Verde	5	100.000	
Azul	6	1.000.000	
Violeta	7	–	
Cinza	8	–	
Branco	9	–	
Ouro		0,1	
Prata		0,01	

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Quais as faixas percentuais de tolerância dos resistores ?

2. Quais os tipos principais de resistores ?

3. Como deve ser interpretado o código de cores dos resistores ?

BIBLIOGRAFIA

HÜBSCHER, HEINRICH ET ALII. **Electrotecnia**, curso elemental. Elektrotechnik Grundstufe Barcelona, Reverté, c 1983, 296 pp.

LOUREIRO, HÉLIO ALBUQUERQUE & FERNANDES, LUIZ EDUARDO PENNA. **Laboratório de dispositivos eletrônicos**. Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1982, 305pp.

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Valorização das Pessoas – Reconhecimento e respeito ás pessoas pelo seu trabalho e valorização destas como agentes de mudança.

Introdução

Em face de os resistores serem normalmente os componentes mais encontrados na maioria dos circuitos eletrônicos, as associações de resistores são também muito comuns.

Assim sendo, é importante que se conheçam os tipos e características elétricas dessas associações, o que se pode classificar como condição indispensável para que se alcance o sucesso no desenvolvimento de qualquer atividade ligada à eletrônica.

Este fascículo, que tratará das associações de resistores e suas resistências equivalentes, visa a capacitá-lo a identificar o tipo de associação e a determinar a sua resistência equivalente.

Para ter sucesso no desenvolvimento do conteúdo e atividades deste fascículo, o leitor já deverá ter conhecimentos relativos a:

- Resistores.

Associação de resistores

A associação de resistores é uma reunião de dois ou mais resistores em um circuito elétrico, como pode ser visto no exemplo da **Fig.1**.

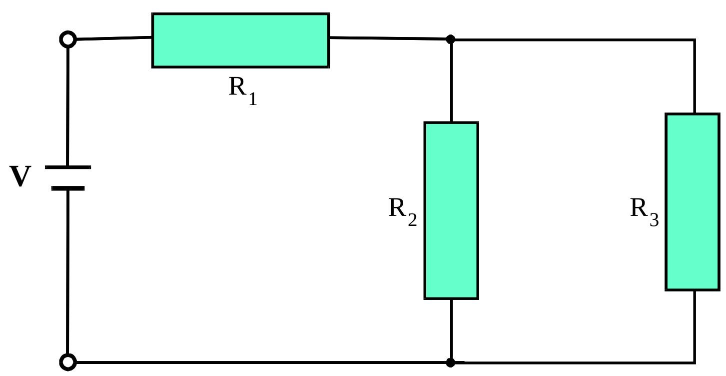


Fig.1 Exemplo da associação de três resistores.

As associações de resistores são utilizadas na maioria dos circuitos elétricos e eletrônicos.

TIPOS DE ASSOCIAÇÕES DE RESISTORES

Os resistores podem ser associados originando circuitos das mais diversas formas. A **Fig.2** mostra alguns tipos de associação de resistores.

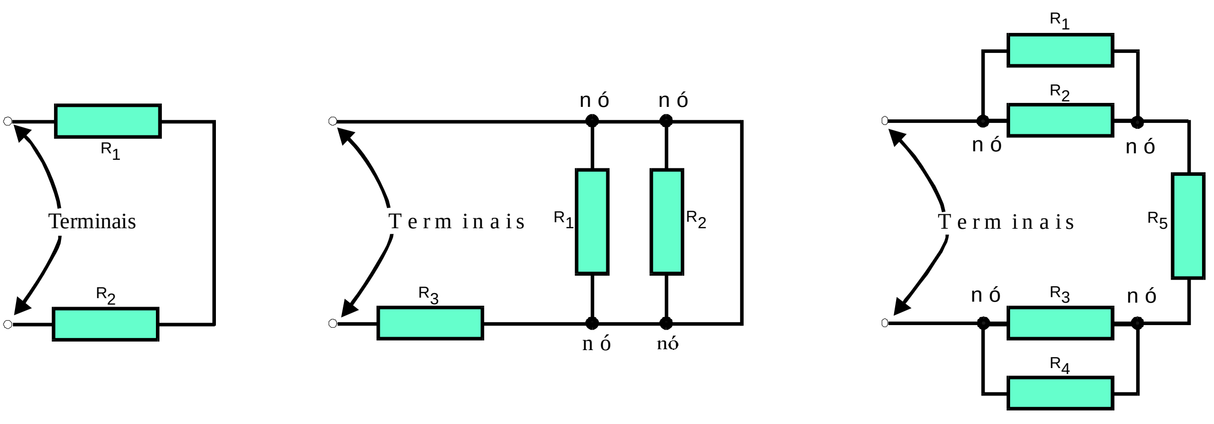


Fig.2 Tipos de associação de resistores.

Como pode ser visto nesta figura, os pontos da associação que são conectados à fonte geradora são denominados de **terminais** e os pontos onde existe a interligação entre dois ou mais resistores são denominados de **nós.**

Apesar do ilimitado número de associações diferentes que se pode obter interligando resistores em um circuito elétrico, todas essas associações podem ser classificadas segundo três designações básicas. São elas:

- Associação série.
- Associação pararela.
- Associação mista.

Cada um dos tipos de associação apresenta características específicas de comportamento elétrico.

ASSOCIAÇÃO SÉRIE DE RESISTORES

Uma associação de resistores é denominada de associação série, quando os resistores que a compõem estão interligados de forma que exista apenas um caminho para a circulação da corrente elétrica entre seus terminais.

Na associação série existe apenas um caminho para circulação da corrente elétrica entre os terminais.

A **Fig.3** mostra dois exemplos de associação série de resistores.

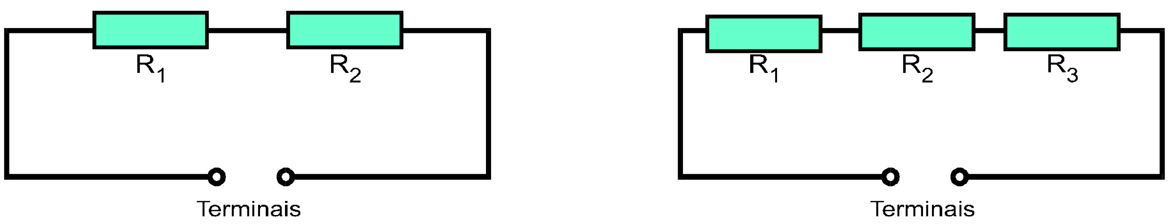


Fig.3 Dois exemplos de associação série de resistores.

Conectando-se uma fonte geradora aos terminais das associações série apresentadas nesta figura, verifica-se que existe realmente apenas um caminho para a circulação da corrente elétrica, conforme ilustrado na **Fig4**.

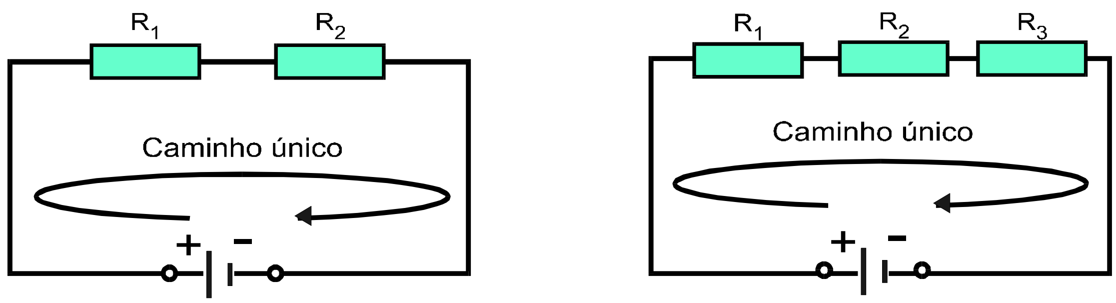


Fig.4 Caminho da corrente em uma associação série de resistores.

ASSOCIAÇÃO PARALELA DE RESISTORES

Uma associação de resistores é denominada **paralela** quando os resistores que a compõem estão interligados de forma que exista mais de um caminho para a circulação da corrente elétrica entre seus terminais.

Na associação paralela existe mais de um caminho para a circulação da corrente elétrica.

A **Fig.5** mostra dois exemplos de associação paralela de resistores.

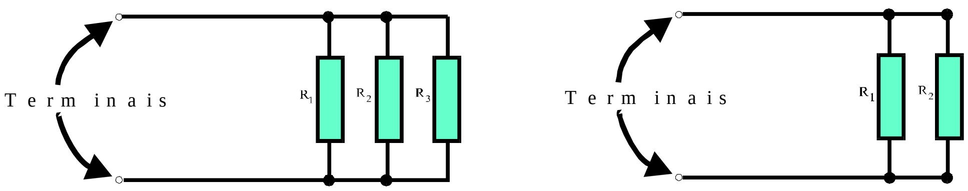


Fig.5 Dois exemplos de associação paralela de resistores.

Conectando-se uma fonte geradora aos terminais das associações paralelas apresentadas nesta figura, verifica-se que existe sempre mais de um caminho para a circulação da corrente elétrica, como pode ser visto na **Fig.6**.

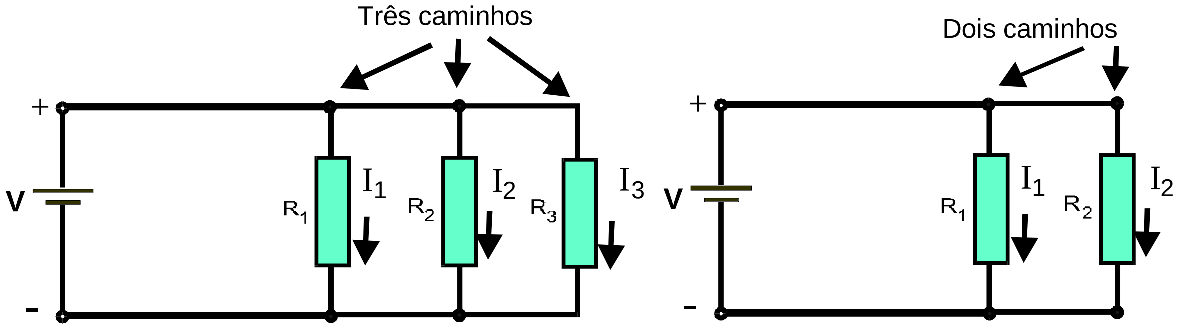


Fig.6 Caminhos da corrente em uma associação paralela de resistores.

ASSOCIAÇÃO MISTA DE RESISTORES

Uma associação de resistores é denominada de **mista** quando for composta por grupos de resistores em série e em paralelo. A **Fig.7** mostra alguns exemplos de associação mista de resistores.

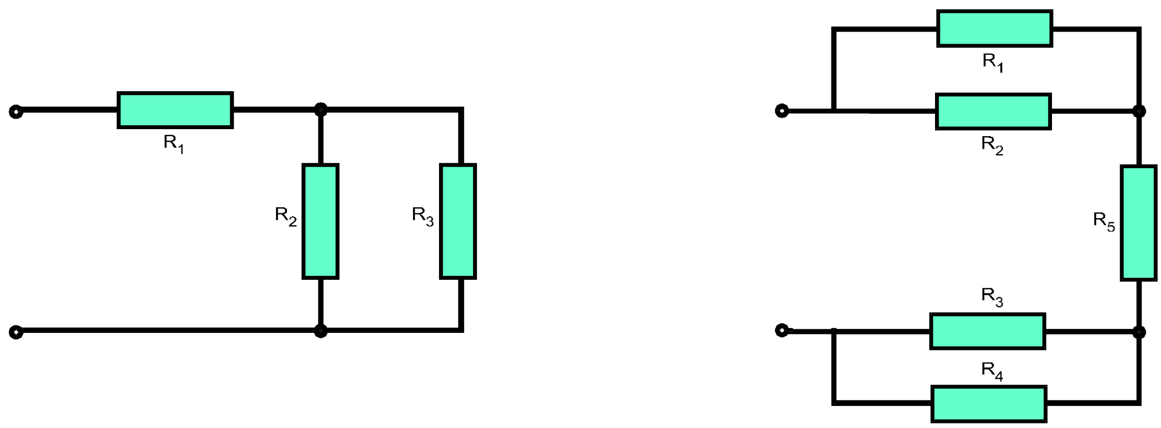


Fig.7 Exemplos de associação mista de resistores.

RESISTÊNCIA EQUIVALENTE DE UMA ASSOCIAÇÃO

Quando se associam resistores, a resistência elétrica entre terminais é diferente das resistências individuais. Por esta razão, a resistência de uma associação de resistores recebe uma denominação específica: **resistência total** ou **resistência equivalente**.

A resistência equivalente de uma associação depende dos valores dos resistores que a compõem e do tipo de associação feita.

RESISTÊNCIA EQUIVALENTE DE UMA ASSOCIAÇÃO SÉRIE

Em uma associação série, a mesma corrente elétrica flui através de todos os resistores, um após o outro. Cada um dos resistores apresenta uma resistência à circulação da corrente no circuito, como ilustrado na **Fig.8.**

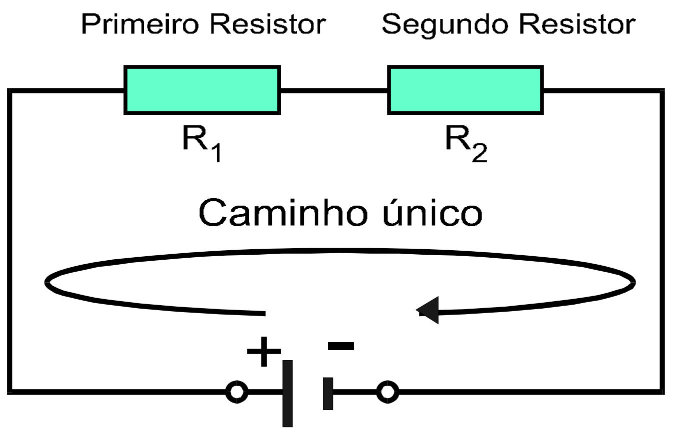


Fig.8 Corrente I percorrendo uma associação série de resistores.

Ao longo de todo o circuito, a resistência equivalente é a soma das resistências parciais. Matematicamente, a resistência equivalente de uma associação série de **n** resistores é dada por:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \ldots.. + R_n \qquad (1)$$

onde R_1, R_2, R_3 .... R_n são os valores ôhmicos dos resistores associados em série.

Assim, se um resistor de 120Ω for conectado em série a um resistor de 270Ω, a resistência equivalente entre os terminais da associação será:

$$R_{eq} = R_1 + R_2$$

$$R_{eq} = 120\Omega + 270\Omega$$

$$R_{eq} = 390\Omega$$

RESISTÊNCIA EQUIVALENTE DE UMA ASSOCIAÇÃO PARALELA

Na associação paralela, existe mais de um caminho para circulação da corrente elétrica, como mostrado na **Fig.9**.

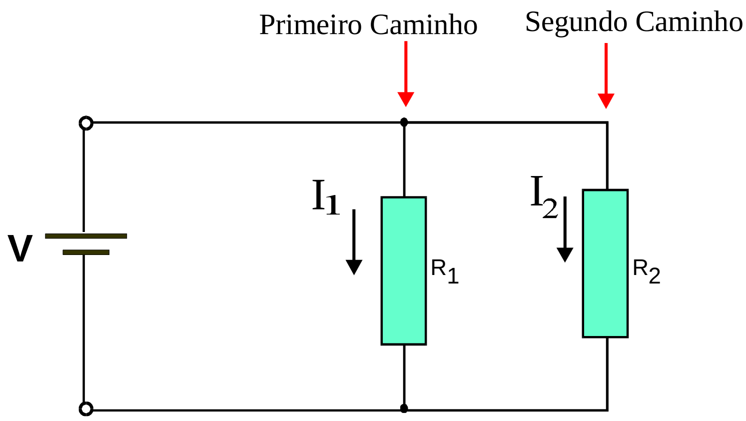


Fig.9 Correntes I_1 e I_2 percorrendo uma associação paralela de resistores.

Dispondo de dois caminhos para circular, a corrente flui com maior facilidade do que se houvesse apenas um caminho.

A partir desta maior facilidade ao circular em um maior número de caminhos do que em um único, verifica-se que a oposição à passagem da corrente em dois (ou mais) resistores em paralelo é menor do que em apenas um.

O valor da resistência equivalente de uma associação de resistores em paralelo é sempre menor que o resistor de menor valor.

Associando-se, por exemplo, um resistor de 120Ω em paralelo com um resistor de 100Ω, a resistência equivalente da associação será, obrigatoriamente menor que 100Ω.

A resistência equivalente de uma associação paralela de resistores é dada pela equação:

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots + \frac{1}{R_n}} \qquad (2)$$

onde R_1, R_2 ..... R_n são valores ôhmicos dos resistores associados.

<u>Exemplo 1</u>:

Calcular a resistência equivalente da associação paralela dos resistores R_1=10Ω, R_2 = 25Ω e R_3 = 20Ω.

<u>Solução</u> :

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{10} + \frac{1}{25} + \frac{1}{20}} = \frac{1}{0{,}1 + 0{,}04 + 0{,}05} = 5{,}26\,\Omega$$

O resultado encontrado comprova que a resistência equivalente da associação paralela (5,26Ω) é menor que o resistor de menor valor (10Ω).

Para associações paralelas com apenas dois resistores, pode-se utilizar uma equação mais simples, deduzida da equação geral:

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{R_1 + R_2}{R_1 \times R_2}} = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} \qquad (3)$$

A resistência equivalente da associação paralela de 2 resistores é dada pela equação $\boldsymbol{R_{eq} = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}}$.

Exemplo 2 :

Cálcular a resistência equivalente da associação paralela de dois resistores R_1 = 1,2kΩ e R_2 = 680Ω com o emprego da **Eq.(3)**.

Solução :

$$R_{eq} = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1.200 \times 680}{1.200 + 680} = \frac{816.000}{1.880} = 434\,\Omega$$

Um outro caso particular da associação de resistores é aquele que envolve a associação de dois ou mais resistores de mesmo valor.

Nesta situação, pode-se utilizar uma terceira equação, específica para associações paralelas onde todos os resistores têm o mesmo valor.

Esta equação também é deduzida da equação geral.

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots + \frac{1}{R_n}}$$

Como neste caso todas as resistências são iguais a R, tem-se que:

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \ldots + \frac{1}{R}} = \frac{1}{n\left(\frac{1}{R}\right)}$$

$$R_{eq} = \frac{R}{n} \qquad (4)$$

A resistência equivalente da associação paralela de n resistores de mesmo valor R é dada pela equação $\boldsymbol{R_{eq} = \frac{R}{n}}$.

Exemplo 3

Calcular a resistência equivalente de três resistores de 120Ω associados em paralelo.

Solução :

$$R_{eq} = \frac{R}{n}$$

$$R_{eq} = \frac{120}{3} = 40\,\Omega$$

RESISTÊNCIA EQUIVALENTE DE UMA ASSOCIAÇÃO MISTA

Para determinar a resistência equivalente de uma associação mista de resistores, utiliza-se um recurso: dividir a associação em pequenas partes que possam ser calculadas como associações série ou paralelas.

Para realizar corretamente a divisão da associação mista, utilizam-se os nós formados no circuito. A partir da identificação dos nós, procura-se analisar como estão ligados os resistores entre cada dois nós do circuito, como ilustra o exemplo da **Fig.10**.

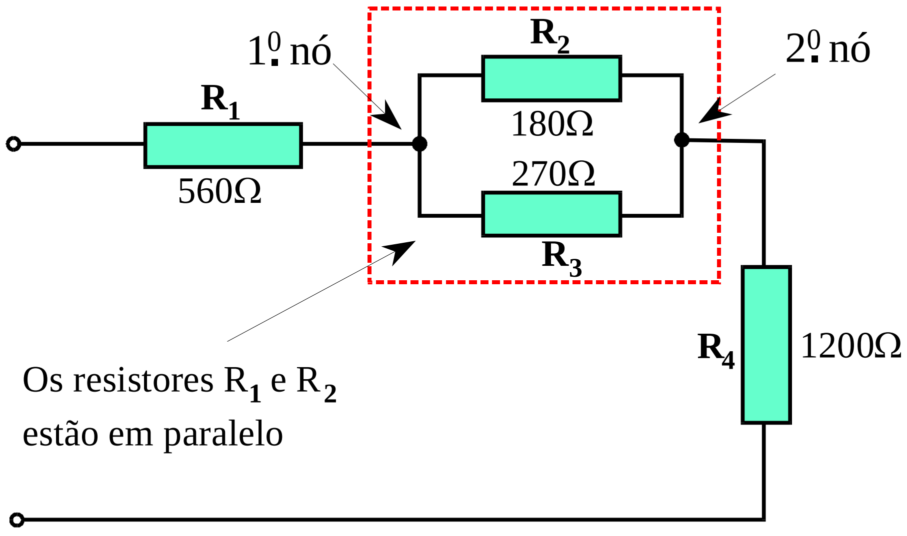


Fig.10 Divisão de uma associação mista em associações série e paralelo.

Desconsiderando-se tudo o que está antes e depois destes nós, e examinando a forma como R_2 e R_3 estão associados, conclui-se que R_2 e R_3 formam uma associação paralela de dois resistores, cuja resistência equivalente pode ser calculada como sendo:

$$R_{eq} = \frac{R_2 \times R_3}{R_2 + R_3} = \frac{180 \times 270}{180 + 270}$$

$$R_{eq} = \frac{48.600}{450} = 108\,\Omega$$

Os dois resistores associados em paralelo R_2 e R_3 podem então ser substituídos por um resistor equivalente, que pode ser chamado de R_a, igual a 108Ω.

Ao executar a substituição, a associação mista original torna-se uma associação série simples, constituída pelos resistores R_1, R_a e R_4, como mostrado na **Fig.11**.

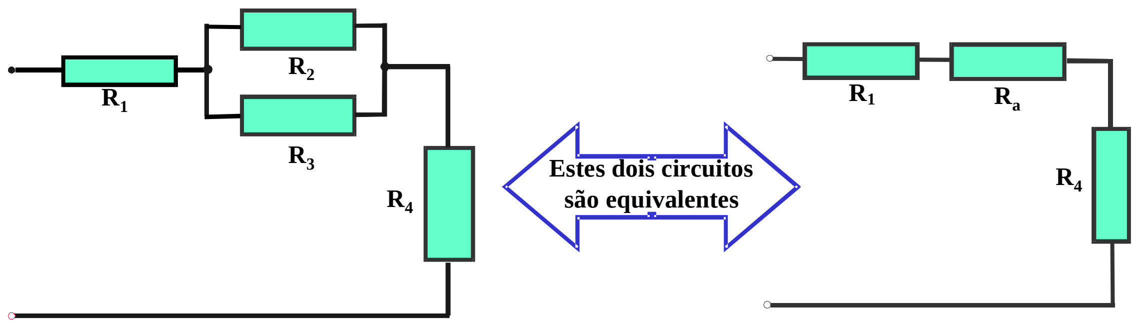


Fig.11 Circuito da Fig.10 simplificado.

A resistência equivalente de toda esta associação é determinada através da equação da associação série.

Usando valores do circuito, tem-se:

$$R_{eq} = R_1 + R_a + R_4$$

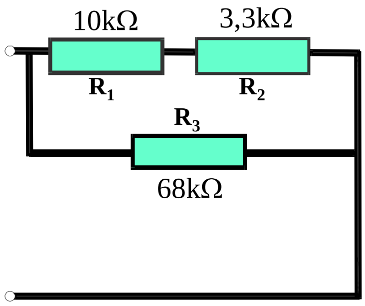
$$R_{eq} = 560\Omega + 108\Omega + 1.200\Omega = 1.868\Omega.$$

O resultado significa que toda associação mista original tem o mesmo efeito para a corrente elétrica que aquele de um único resistor de 1.868Ω.

Exemplo 4

Determinar a resistência equivalente da associação de resistores mostrada na figura abaixo.

Solução :

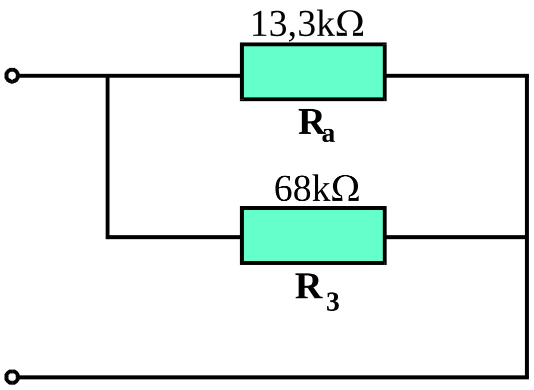


Como pode ser visto nesta figura, os resistores R_1 e R_2 estão ligados em série e, portanto, podem ser substituídos pelo seguinte resistor equivalente:

$$R_{eq} = R_1 + R_2$$

$$R_{eq} = 10.000 + 3.300 = 13.300\Omega.$$

Substituindo-se, portanto, R_1 e R_2 pelo seu valor equivalente R_a no circuito original, tem-se:



Analisando o circuito formado por R_a e R_3, vê-se que estes resistores estão em paralelo e por isto podem ser substituídos pelo seguinte resistor equivalente:

$$R_{eq} = \frac{R_a \times R_3}{R_a + R_3} = \frac{13.300 \times 68.000}{13.300 + 68.000}$$

$$R_{eq} = 11.124\ \Omega.$$

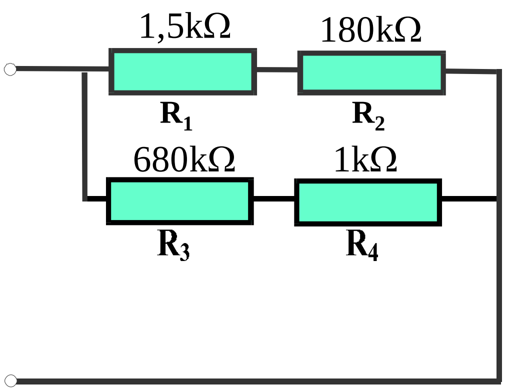
A partir deste resultado, conclui-se que toda a associação mista pode ser substituída por um único resistor de 11.124 Ω .

Aplicando-se uma tensão a toda a associação de resistores ou a um único resistor de 11.124Ω, a corrente total que circula no circuito é a mesma.

Exemplo 5

Determinar a resistência equivalente da associação de resistores mostrada na figura abaixo.

Solução :



Como pode ser visto nesta figura, os resistores R_1 e R_2 estão ligados em série e R_3 e R_4 também. Deste modo, R_1 e R_2 podem ser substituídos por um resistor R_a equivalente e R_3 e R_4 por outro resistor equivalente R_b, cujos valores são :

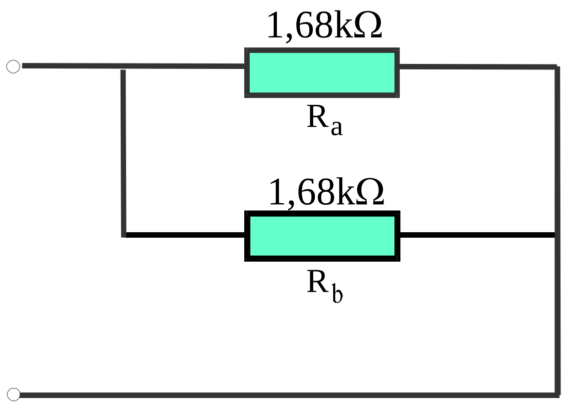
$$R_a = R_1 + R_2$$

$$R_a = 1.500\Omega + 180\Omega = 1.680\Omega.$$

$$R_b = R_3 + R_4$$

$$R_b = 680\Omega + 1.000\Omega = 1.680\Omega.$$

Substituindo R_1 e R_2 por R_a e R_3 e R_4 por R_b no circuito original, tem-se:



A resistência equivalente da associação é portanto:

$$R_{eq} = \frac{R}{n}$$

$$R_{eq} = \frac{1.680}{2} = 840\,\Omega$$

Toda associação pode ser substituída por um único resistor de 840Ω.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Em uma associação série de resistores, existem quantos caminhos para a circulacão da corrente elétrica entre os terminais ? E em uma associação paralela ?

2. O valor da resistência equivalente de uma associação de resistores em paralelo é sempre maior ou menor que o resistor de menor valor ?

BIBLIOGRAFIA

SENAI/ Departamento Nacional, **Associação de resistores**, Divisão de Ensino e Treinamento, 1980, 71p. (Módulo Instrucional: Eletricidade-Eletrotécnica, 6).

VAN VALKENBURG, NOOGER & NEVILLE. **Eletricidade Básica**. 12.ª ed. São Paulo, Freitas Bastos, 1970, v.2.

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Imagem Institucional – Desenvolver ações que atendam as reais necessidades do mercado.

Introdução

O funcionamento de qualquer aparelho elétrico ou eletrônico depende da existência de uma fonte de energia elétrica. Até mesmo os relógios digitais possuem pequenas pilhas no seu interior. Isto, sem dúvida, mostra a importância dos fornecedores de energia elétrica.

No desenvolvimento das atividades práticas de um curso de eletrônica as fontes também são constantemente utilizadas. Em função do grande número de situações diferentes que ocorrem nas experiências práticas neste tipo de curso, não é costume utilizarem-se pilhas ou baterias como fonte de energia. Utilizam-se, geralmente, fontes de CC com características apropriadas às várias situações.

Este fascículo foi elaborado visando a proporcionar-lhe os conhecimentos indispensáveis sobre as fontes de CC que irão capacitá-lo a selecionar e utilizar fontes de CC convencionais ou simétricas.

Estude-o com atenção, porque as fontes de CC o acompanharão ao longo de todo o estudo de eletrônica básica.

Para ter sucesso no desenvolvimento do conteúdo e atividades deste fascículo, o leitor já deverá ter conhecimentos relativos a:

- Tensão elétrica CC.
- Corrente elétrica.

Fonte de CC

É um equipamento que fornece tensão contínua para a alimentação de circuitos elétricos e eletrônicos. A **Fig.1** mostra uma fonte CC típica.

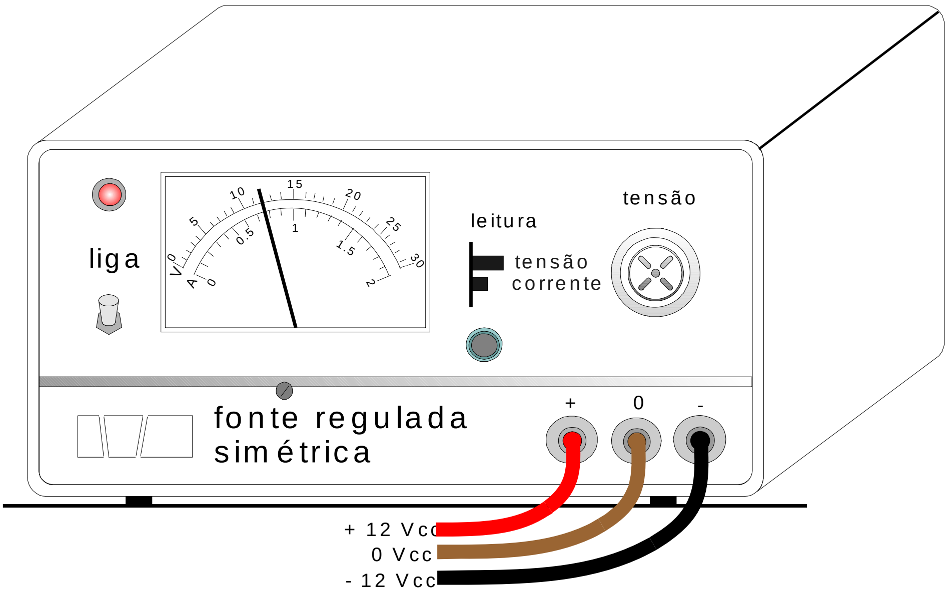


Fig.1 Fonte de alimentação de tensão CC.

Este tipo de fonte de alimentação substitui com vantagens as pilhas e baterias no fornecimento de energia aos circuitos porque permite que se obtenha o valor de tensão necessário a cada equipamento.

CARACTERÍSTICAS DAS FONTES CC

Para se usar corretamente uma fonte CC, deve-se observar basicamente três itens:

a) A tensão de entrada.
b) A tensão ajustável na saída.
c) A capacidade de corrente.

TENSÃO DE ENTRADA

Valor de tensão de funcionamento do equipamento. Normalmente as fontes dispõem de uma chave para duas tensões:110/220V. Esta chave permite que a fonte seja utilizada em locais onde a tensão da rede elétrica é de 110 ou 220V.

TENSÃO AJUSTÁVEL NA SAÍDA

Estabelece os limites mínimo e máximo de tensão contínua que se pode obter na saída. Por exemplo, a fonte ajustada nos limites 0 e 30Vcc, fornece de 0 até 30V contínuos na saída.

CAPACIDADE DE CORRENTE

Estabelece o valor máximo de corrente que a fonte pode fornecer.

CONTROLES E DISPOSITIVOS

Os controles e dispositivos são destinados à preparação e utilização da fonte. Os controles serão apresentados com base no modelo de fonte de CC mostrado na **Fig.2**.

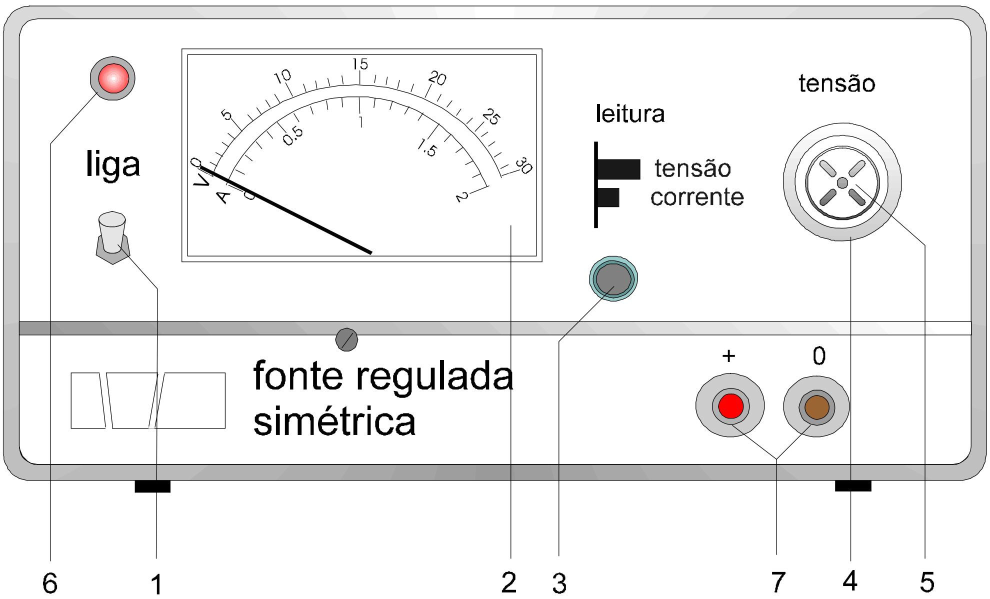


Fig.2 Um modelo de fonte de tensão CC.

1 - CHAVE LIGA-DESLIGA

Permite a ligação da fonte. Quando a chave está desligada não há tensão na saída da fonte.

2 - INSTRUMENTO INDICADOR

As fontes de alimentação de CC ajustável de boa qualidade possuem um instrumento no painel que permite visualizar imediatamente o valor de tensão que está presente nos seus bornes de saída. Em alguns modelos de fonte, este instrumento pode indicar também a corrente fornecida para a carga.

3 - SETOR TENSÃO - CORRENTE DO INSTRUMENTO INDICADOR

Permite que se use o instrumento do painel como indicador de tensão nos bornes de saída ou como indicador da corrente fornecida pela fonte ao circuito conectado nos seus bornes.

4 - CONTROLE DE AJUSTE DE TENSÃO DE SAÍDA

Permite ajustar a tensão de saída para o valor desejado (ajuste principal).

5 - CONTROLE DE AJUSTE FINO DA TENSÃO DE SAÍDA

Funciona em conjunto com o controle principal de tensão de saída. Permite que se faça um ajuste mais preciso da tensão de saída nas proximidades do valor estabelecido pelo ajuste principal.

Por exemplo, quando o botão de ajuste estabelece uma tensão de saída de 12V, o ajuste fino permite que se varie esta tensão para valores um pouco menores ou maiores que 12V.

6 - INDICADOR LUMINOSO

Indicador de que o equipamento está ligado ou não.

7 - BORNES

Os bornes são os terminais de saída da fonte (como os pólos de uma pilha). A tensão CC é fornecida pela fonte nos bornes + (vermelho) e - (preto).

ESCOLHA DA FONTE

Para se escolher uma fonte, deve-se conhecer:

a) A tensão da rede em que a fonte será ligada.
b) A tensão de que a carga necessita.
c) A corrente que a carga solicita.

A seleção da tensão de entrada da fonte depende exclusivamente da tensão da rede da localidade. Assim, nas cidades cuja tensão da rede é 110V, deve-se selecionar a chave 110V/220V na posição 110V. Do mesmo modo, naquelas localidades onde a tensão da rede é 220V, a chave 110V/220V deve ser posicionada em 220V.

Para se atender à tensão de que a carga necessita, a tensão de saída da fonte deve ser ajustada a esta tensão. Por exemplo, para uma carga que necessita de uma alimentação de 12Vcc, pode-se utilizar fontes cujas tensões de saída sejam 12Vcc, 0 - 15Vcc ou 0 - 30Vcc. Nas fontes com tensão de saída ajustável (por exemplo 0 - 15Vcc ou 0 - 30Vcc), deve-se no caso ajustá-la para 12Vcc.

Com relação à corrente da carga, a fonte deve ter capacidade de corrente **maior** que a necessária para a carga. Por exemplo, para alimentar uma carga que solicita 0,80A, a fonte deve ter capacidade de corrente superior a este valor (1,0A, 1,5A, 2,0A etc.).

SIMBOLOGIA

Os símbolos utilizados para representar uma fonte CC podem ser vistos na **Fig.3**.

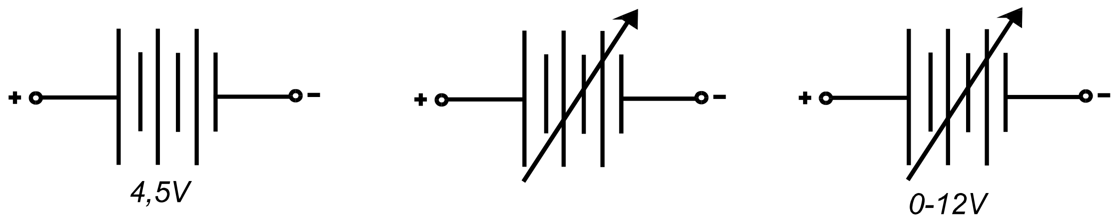


Fig.3 Símbolos de uma fonte CC.

Note que a diferença entre o símbolo da fonte CC de tensão de saída fixa e o símbolo da fonte CC de tensão de saída variável é apenas a seta na diagonal.

Fontes simétricas

São fontes de tensão contínua que fornecem duas tensões, uma positiva e outra negativa em relação a um borne comum. A **Fig.4** mostra uma fonte simétrica típica.

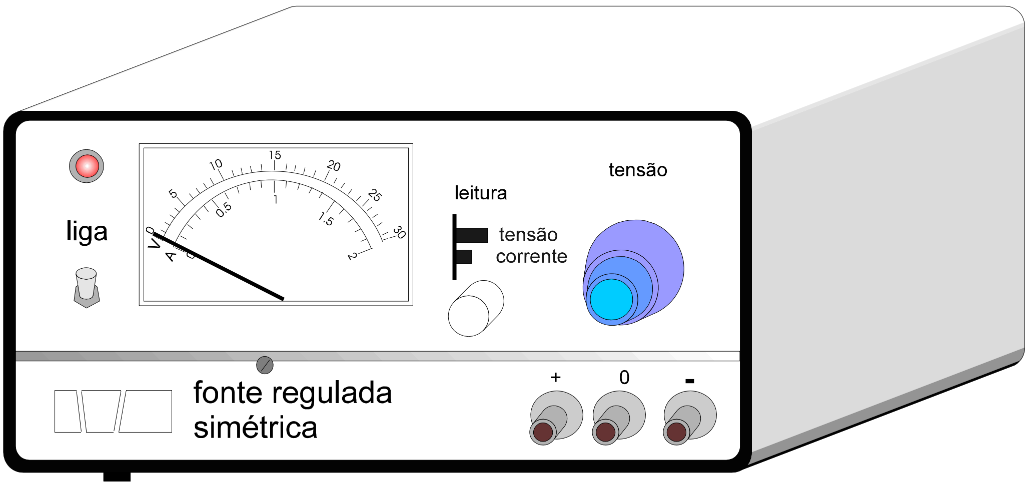


Fig.4 Fonte simétrica típica.

CARACTERÍSTICAS DAS FONTES SIMÉTRICAS

As principais características das fontes simétricas são as mesmas das fontes convencionais:

- Tensão de entrada (110/220V).
- Tensão de saída (por exemplo, 0 a 30V).
- Capacidade de corrente (por exemplo, 0-1A).

CONTROLES E DISPOSITIVOS

De forma geral, as fontes de CC simétricas têm os mesmos controles e dispositivos que as fontes convencionais:

- Chave liga-desliga.
- Indicador luminoso de ligação.
- Instrumento indicador da tensão de saída (opcional).
- Controle de ajuste da tensão de saída.
- Bornes.

A diferença entre a fonte simétrica e a convencional encontra-se nos bornes e na forma de atuação do controle de tensão da saída.

As fontes simétricas apresentam 3 bornes de saída:

- Borne de saída positivo, indicado pelo sinal +.
- Borne de saída 0 (zero) ou comum, indicado pelos símbolos 0 ou COM.
- Borne de saída negativo, indicado pelo sinal menos.

O borne positivo (+) fornece tensões positivas com relação ao borne 0 (zero) e o borne negativo (-) fornece tensões negativas como relação ao borne 0 , como indicado na **Fig.5**.

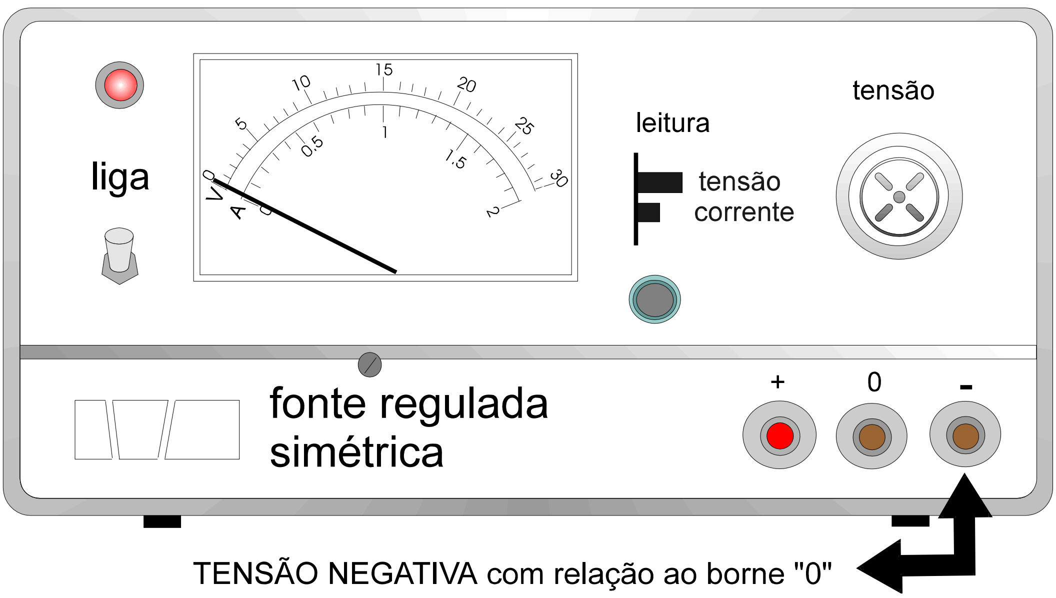


Fig.5 Indicação dos bornes positivo e negativo.

O controle de ajuste da tensão de saída atua simultaneamente nos bornes positivo e negativo, como ilustrado na **Fig.6**.

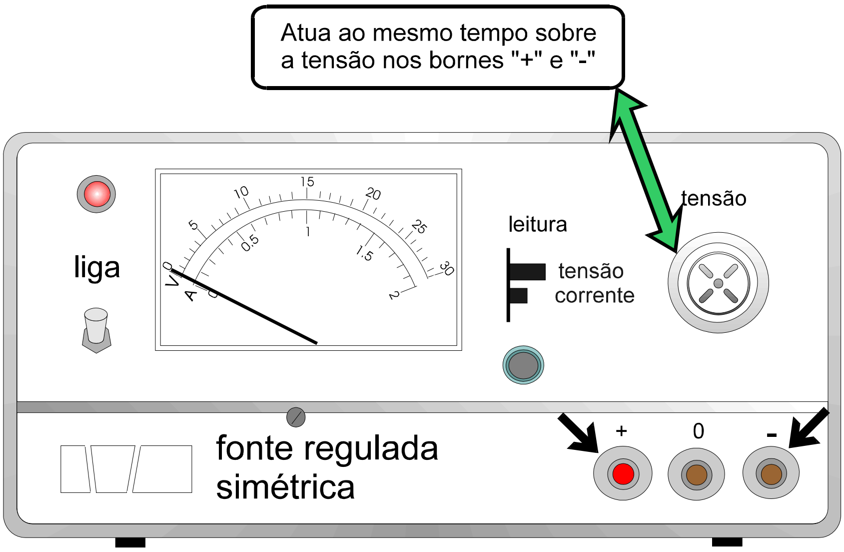


Fig.6 Controle de ajuste da tensão de saída.

Por exemplo, ao ajustar a tensão do borne positivo para + 15V em relação ao borne 0, a tensão do borne negativo será -15V em relação ao borne 0. Isto significa que a tensão no borne positivo tem o mesmo valor que a do borne negativo, diferindo apenas no sinal, como mostrado na **Fig.7**.

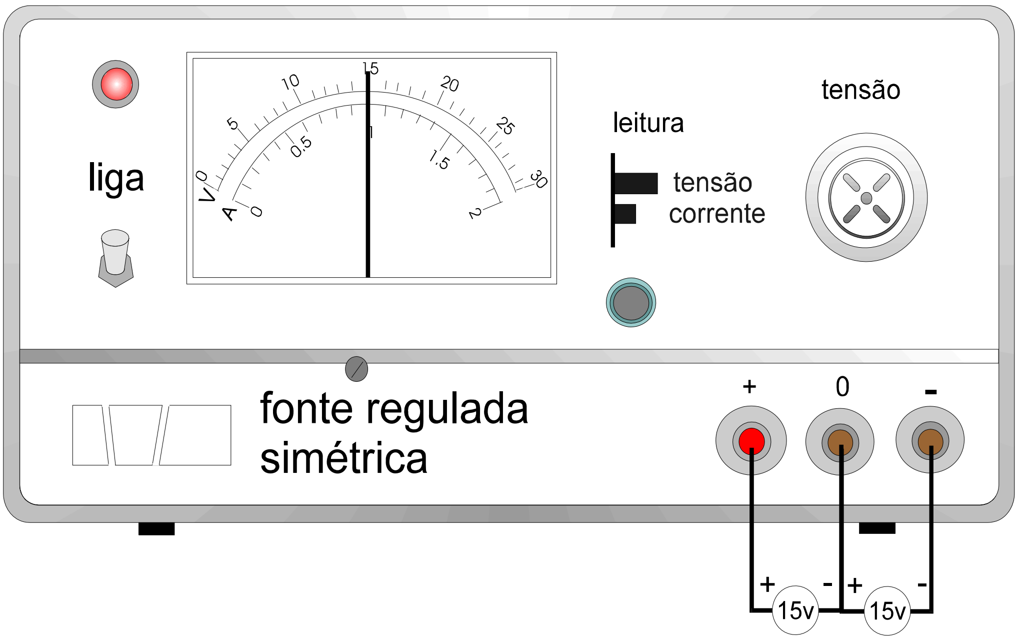


Fig.7 Ajuste de uma tensão de 15V.

UTILIZAÇÃO DOS BORNES DE SAÍDA

As fontes simétricas podem ser usadas como fontes convencionais, utilizando apenas dois bornes. São possíveis três situações:

- **Usando-se os bornes + e 0**

A fonte simétrica se comporta como uma fonte convencional. O borne + fornece tensão positiva em relação ao borne 0, que se comporta como terminal negativo da fonte. A tensão de saída entre os bornes é ajustada no controle de tensão de saída, como mostra a **Fig.8**.

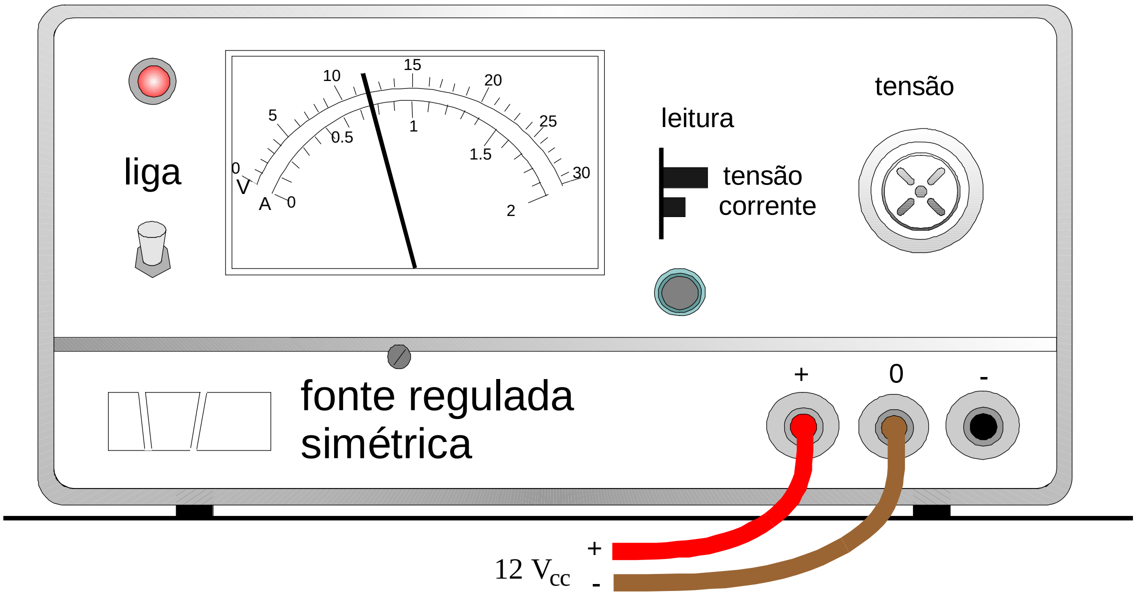


Fig.8 Utilização dos bornes + e 0 de uma fonte simétrica.

- **Usando-se os bornes 0 e -**

A fonte simétrica se comporta como uma fonte convencional. O borne - fornece tensão negativa em relação ao borne 0, que se comporta como terminal positivo (menos negativo) da fonte. A tensão de saída é ajustada no controle de tensão saída, conforme ilustrado na **Fig.9**.

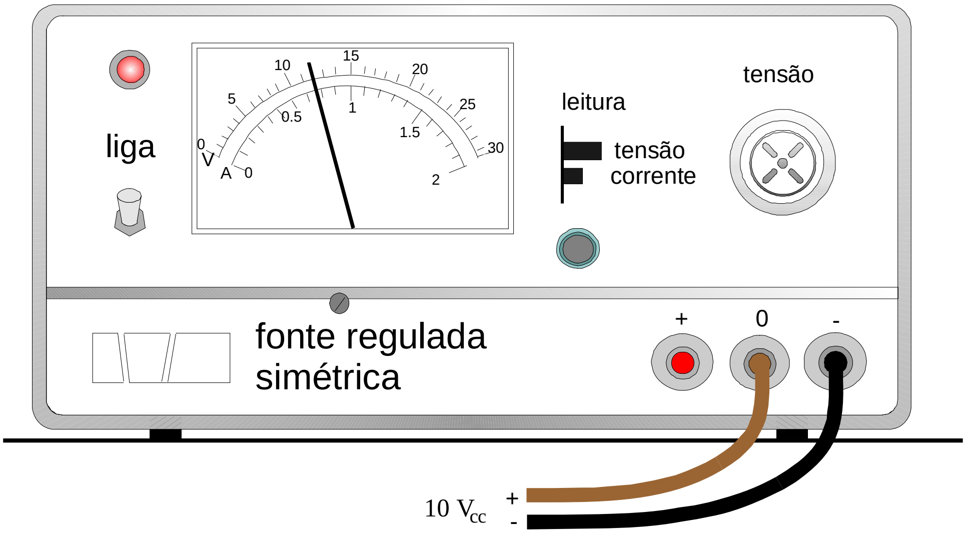


Fig.9 Utilização dos bornes 0 e - de uma fonte simétrica.

- **Usando os bornes + e -**

A fonte se comporta como uma fonte convencional. O borne + fornece tensão positiva em relação ao borne -. A tensão de saída é o dobro da tensão presente entre os bornes + e 0, como mostrado na **Fig.10**.

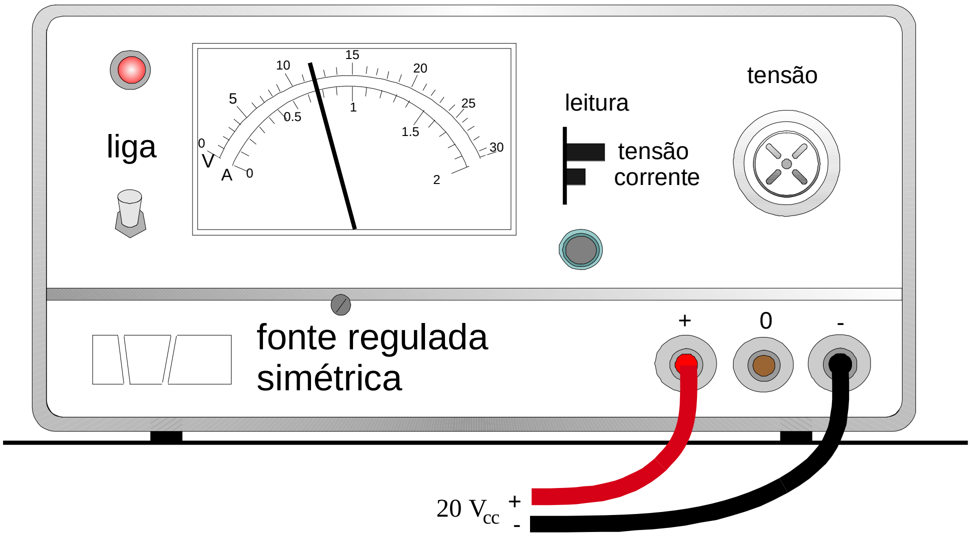


Fig.10 Utilização dos bornes + e - de uma fonte simétrica.

Os três bornes de saída podem ser utilizados simultaneamente para eliminar circuitos que necessitam de tensões positivas e negativas ao mesmo tempo, como pode ser visto na **Fig.11**.

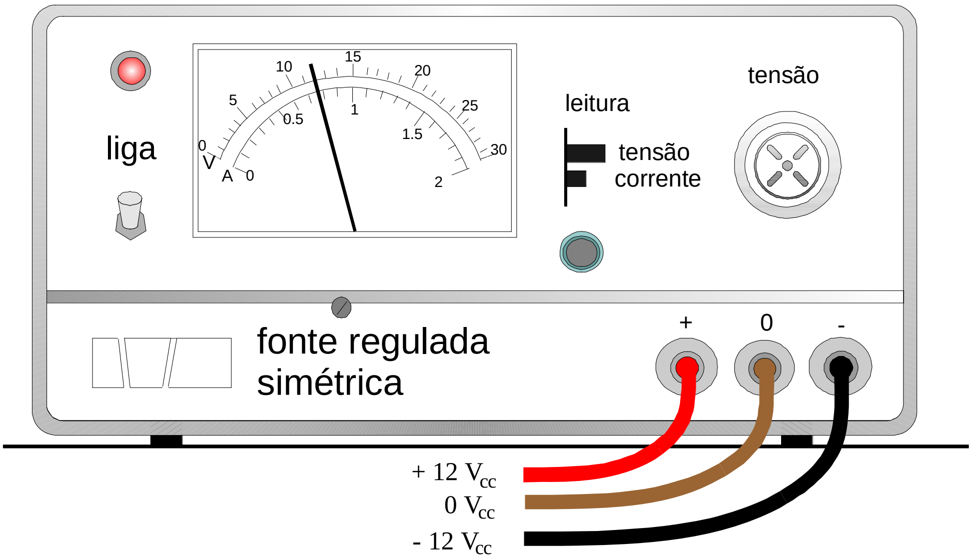


Fig.11 Alimentação de circuitos que necessitam de tensões negativas e positivas.

ESCOLHA DA FONTE SIMÉTRICA

Os critérios para a escolha de uma fonte simétrica são os mesmos de uma fonte comum.

- Tensão de funcionamento da fonte de acordo com a rede.
- Tensão de saída ajustável de acordo com a tensão da carga (entre bornes + e 0, - e 0 ou + e -).
- Capacidade de corrente superior à da carga.

MANUSEIO DAS FONTES DE CC

Para que uma fonte de CC seja utilizada como fornecedora de energia para qualquer circuito, é necessário realizar sua preparação.

A preparação se divide em duas etapas:

- Conexão à rede elétrica.
- Ligação e ajuste da tensão de saída.

CONEXÃO A REDE ELÉTRICA

As fontes de CC são alimentadas a partir da rede elétrica, como ilustrado na **Fig.12**.

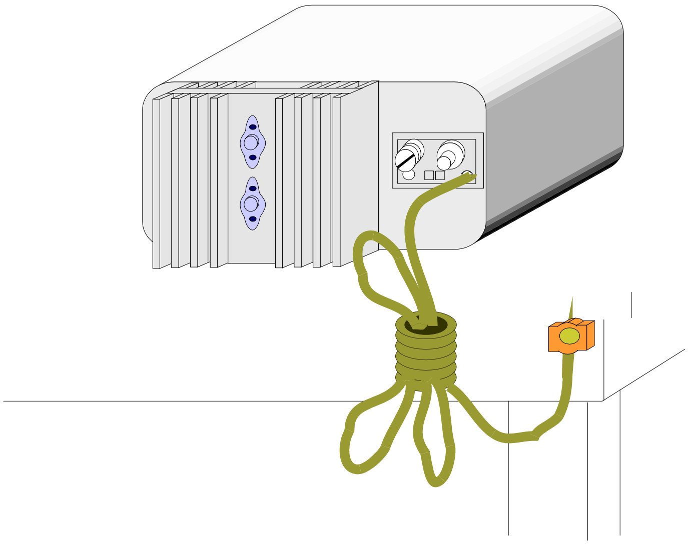


Fig.12 Alimentação da fonte CC na rede elétrica.

Antes de conectar o cabo de alimentação à rede elétrica, deve-se verificar se a chave 110/220V (normalmente na parte posterior da fonte) está posicionada corretamente, de acordo com a tensão da rede elétrica do local.

LIGAÇÃO E AJUSTE

A ligação da fonte é feita na chave liga-desliga no painel. Para realizar o ajuste da tensão de saída da fonte, deve-se utilizar o voltímetro próprio do equipamento (se houver) ou um multímetro. Quando a fonte tiver uma chave seletora para o instrumento indicador (**tensão-corrente**), deve-se posicioná-la para **tensão**, para que o instrumento indique a tensão presente nos bornes.

Nas fontes simétricas, o ajuste da tensão de saída é feito com o instrumento conectado entre os bornes que serão utlizados (+ e 0, 0 e - ou + e -). Os ajustes devem ser executados **antes de ligar qualquer circuito nos terminais de saída da fonte**.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Que cuidados se deve ter para se usar corretamente uma fonte CC ?

2. Por que fatores deve orientar-se o usuário na escolha de uma fonte CC adequada ?

3. Que são fontes simétricas ?

BIBLIOGRAFIA

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Educação Permanente – Torna-se um imperativo com o compromisso mútuo entre pessoas e entidade, em favor do crescimento pessoal, institucional e da sociedade.

Introdução

Desde muito tempo os fenômenos elétricos têm despertado a curiosidade do homem. Nos primórdios da eletricidade esta curiosidade levou um sem número de cientistas a se dedicarem ao estudo da eletricidade. George Simon Ohm foi um desses cientistas, dedicando-se ao estudo da corrente elétrica. Através dos seus estudos, Ohm definiu uma relação entre a corrente, a tensão e a resistência elétrica em um circuito, denominada Lei de Ohm. Hoje, ampliados os conhecimentos sobre eletricidade, a Lei de Ohm é tida como a lei básica da Eletricidade.

Este fascículo, que tratará da Lei de Ohm, foi elaborado visando a capacitá-lo a determinar matematicamente grandezas elétricas em um circuito.

Para ter sucesso no desenvolvimento do conteúdo e atividades deste fascículo, o leitor já deverá ter conhecimentos relativos a:

- Tensão elétrica.
- Corrente e resistência elétrica.

Lei de Ohm

A Lei de Ohm estabelece uma relação entre as grandezas elétricas tensão, corrente e resistência em um circuito.

A Lei de Ohm é a lei básica da eletricidade e da eletrônica. Seu conhecimento é fundamental para o estudo e compreensão dos circuitos elétricos.

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA LEI DE OHM

A Lei de Ohm pode ser obtida a partir de medições de tensão, corrente e resistência realizadas em circuitos elétricos simples, compostos por uma fonte geradora e um resistor. Montando-se um circuito elétrico composto por uma fonte geradora de 9V e um resistor de 100Ω, verifica-se que a corrente circulante é de 90mA, como ilustrado na **Fig.1**.

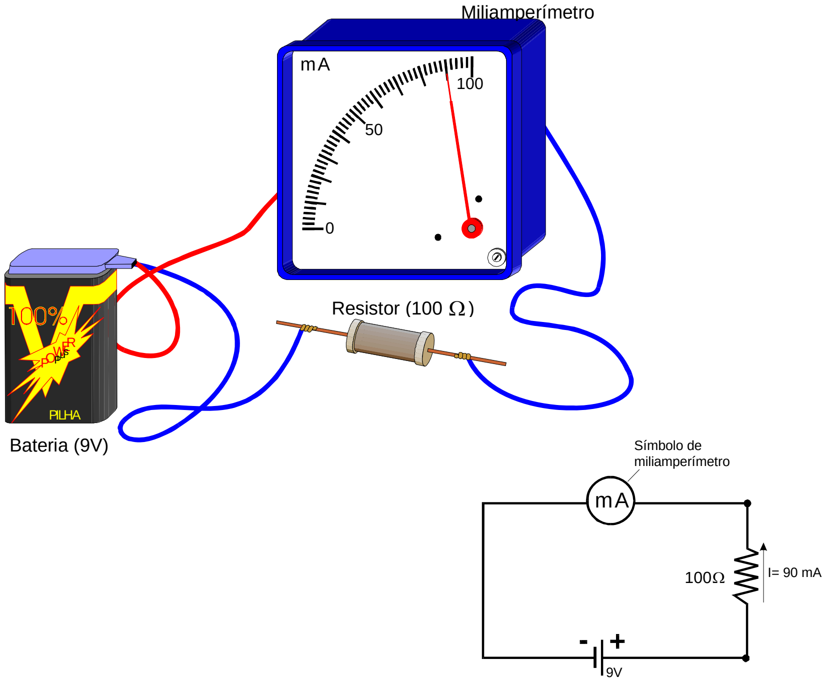


Fig.1 Carga de 100Ω alimentada por uma bateria de 9V.

Substituindo-se o resistor de 100Ω por outro de 200Ω, a resistência do circuito torna-se maior. O circuito impõe maior oposição à passagem da corrente, fazendo com que a corrente circulante seja menor, como pode ser visto na **Fig.2**.

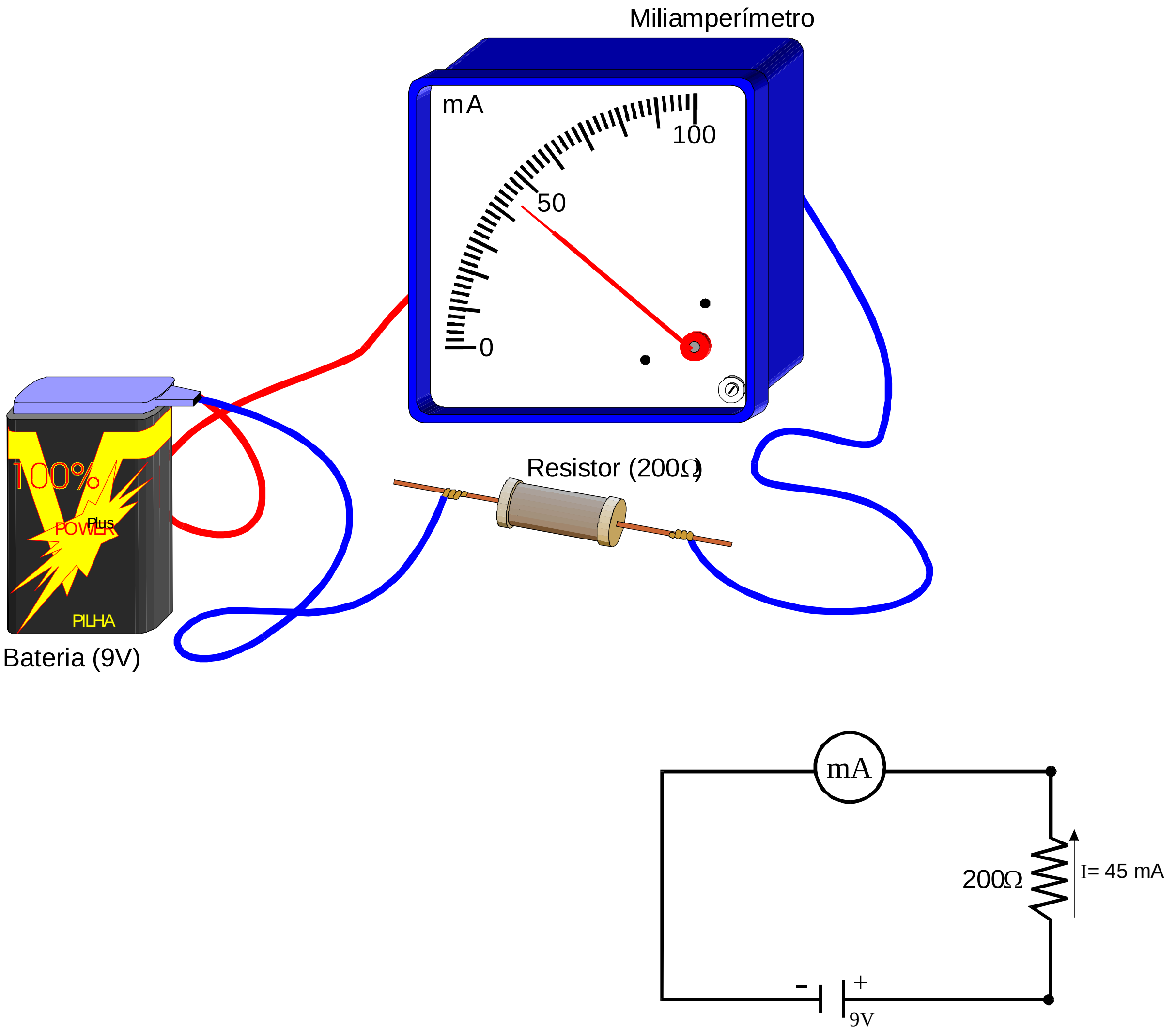


Fig.2 Carga de 200Ω alimentada por uma bateria de 9V.

Aumentando-se sucessivamente o valor do resistor, a oposição à passagem da corrente é cada vez maior e a corrente, cada vez menor, conforme mostrado nas **Figs.3 e 4**.

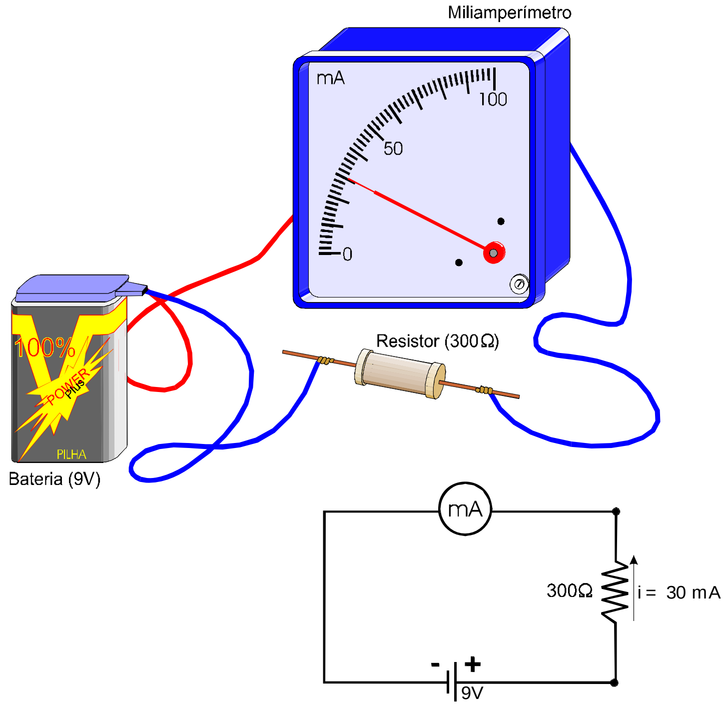


Fig.3 Carga de 300Ω alimentada por uma bateria de 9V.

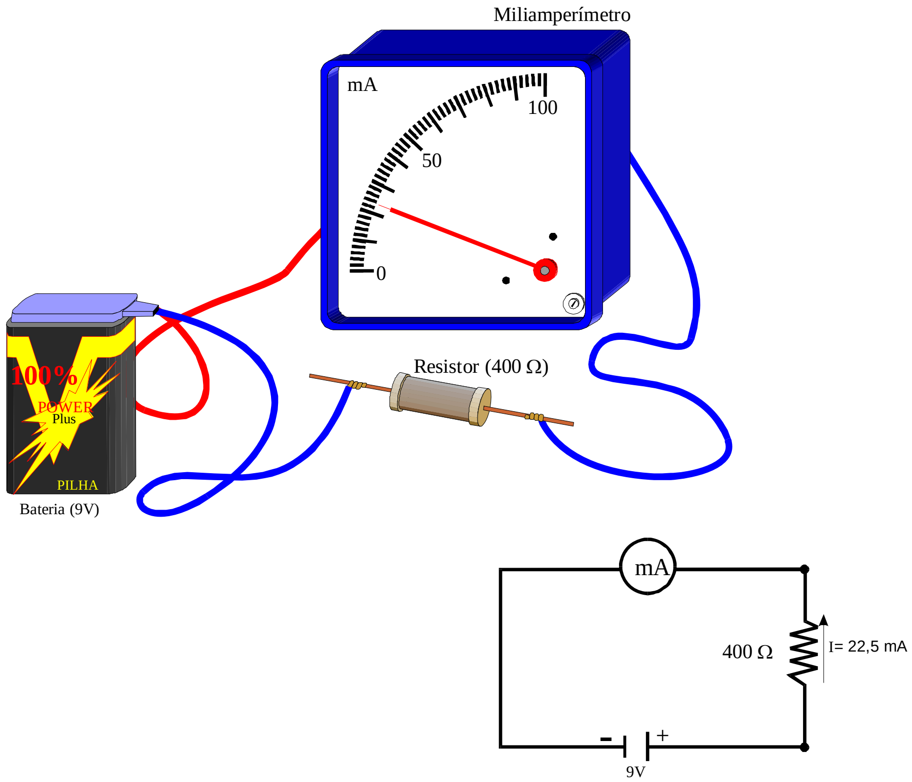


Fig.4 Carga de 400Ω alimentada por uma bateria de 9V.

A **Tabela 1** mostra os valores obtidos nas diversas situações descritas anteriormente.

Tabela 1 Valores de tensão e corrente para diversas cargas.

Situação	Tensão (V)	Resistência (R)	Corrente (I)
1	9V	100Ω	90mA
2	9V	200Ω	45mA
3	9V	300Ω	30mA
4	9V	400Ω	22,5mA

Observando-se a tabela de valores, verifica-se que :

a) Mantida a mesma tensão, a corrente em um circuito diminui quando a resistência do circuito aumenta.

b) Dividindo-se o valor de tensão aplicada pela resistência do circuito, obtém-se o valor da intensidade de corrente.

O valor de corrente que circula em um circuito pode ser encontrada dividindo-se o valor de tensão aplicada pela sua resistência.

Transformando em equação matemática esta afirmação, tem-se:

$$I = \frac{V}{R} \qquad (1)$$

Esta equação é conhecida como equação matemática da Lei de Ohm.

A intensidade da corrente elétrica em um circuito é diretamente proporcional à tensão aplicada e inversamente proporcional a sua resistência.

APLICAÇÃO DA LEI DE OHM

A Lei de Ohm pode ser utilizada para se determinarem os valores de tensão (V), corrente (I) ou resistência R em um circuito.

Sempre que se conhecem dois valores em um circuito (V e I, V e R ou R e I), o terceiro valor desconhecido pode ser determinado pela Lei de Ohm.

Para tornar mais simples o uso da equação da Lei de Ohm, costuma-se usar o **triângulo** mostrado na **Fig.5.**

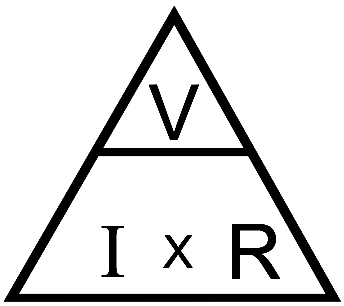


Fig.5 Triângulo da Lei de Ohm.

Quando se deseja determinar a intensidade da corrente (I) que flui em um circuito, coloca-se o dedo sobre a letra I do triângulo, como ilustrado na **Fig.6**.

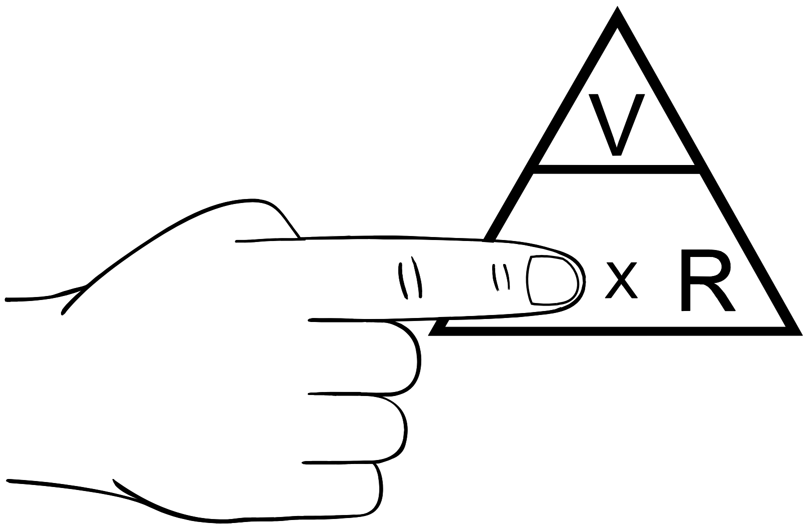


Fig.6 Determinação da intensidade de corrente.

Com a letra I (corrente) coberta, o triângulo fornece a equação que deve ser usada para calcular a corrente do circuito.

$$I = \frac{V}{R}$$

Quando for necessário determinar a resistência R de um circuito, deve-se cobrir a letra R do triângulo e a equação necessária será encontrada, como pode ser visto na **Fig.7**.

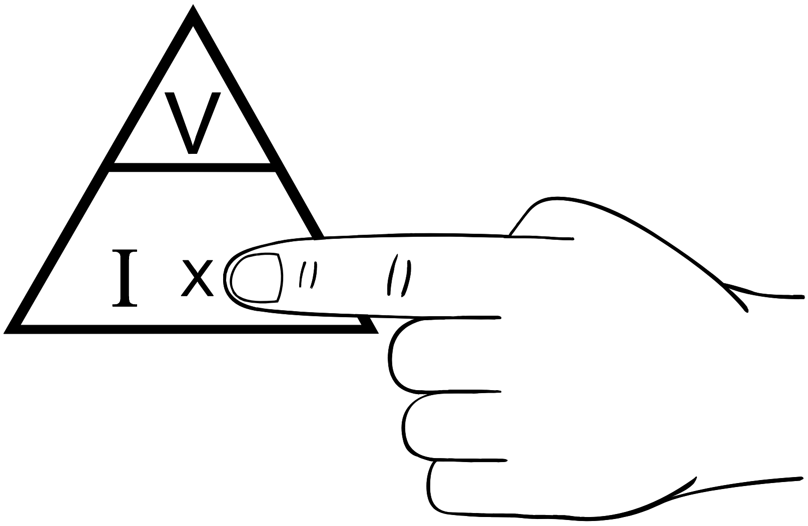


Fig. 7 Determinação da resistência.

Da mesma forma, pode-se determinar a tensão aplicada em um circuito quando se conhece a corrente e a resistência, como ilustra a **Fig.8**.

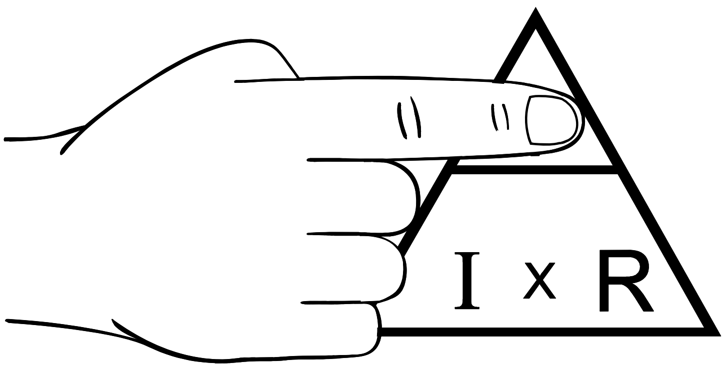


Fig.8 Determinação da tensão.

Para que as equações decorrentes da Lei de Ohm sejam utilizadas, as grandezas elétricas devem ter seus valores expressos nas unidades fundamentais: Volt, Ampère e Ohm. Quando os valores de um circuito estiverem expressos em múltiplos ou submúltiplos das unidades, devem ser convertidos para as unidades fundamentais antes de serem usados nas equações.

Exemplo 1:

Uma lâmpada utiliza uma alimentação de 6V e tem 36Ω de resistência. Qual a corrente que circula pela lâmpada quando ligada?

Solução :

Como os valores de V e R já estão nas unidades fundamentais (Volt e Ohm), aplicam-se os valores na equação:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{6}{36} = 0{,}166\text{A}$$

O resultado é dado também na unidade fundamental de intensidade de corrente. A resposta indica que circulam 0,166A ou 166mA quando a lanterna é ligada.

A **Fig.9** mostra o miliamperímetro com a indicação do valor consumido pela lâmpada.

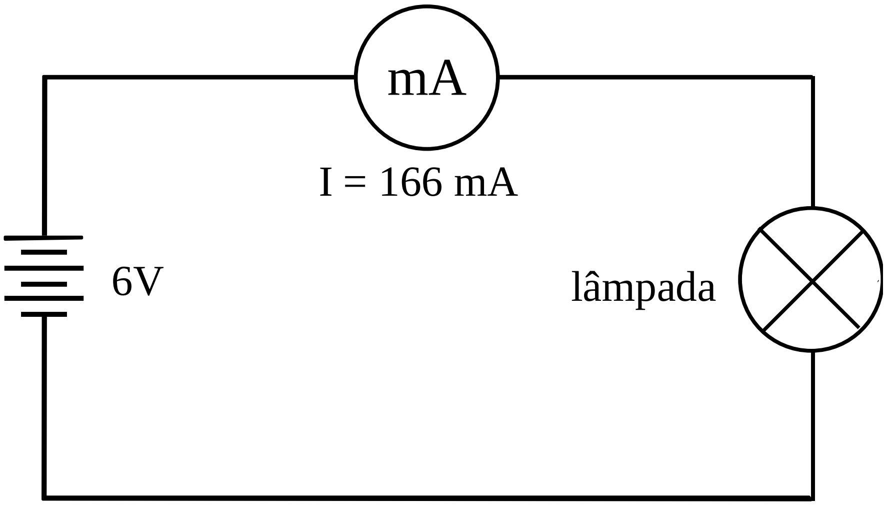


Fig.9 Indicação da corrente na lâmpada.

Exemplo 2:

O motor de um carrinho de autorama atinge rotação máxima quando recebe 9V da fonte de alimentação. Nesta situação, a corrente do motor é de 230mA. Qual é a resistência do motor?

Solução :

$$R = \frac{V}{I} = \frac{9}{0,23} = 39,1\Omega$$

Exemplo 3:

Um resistor de 22kΩ foi conectado a uma fonte cuja tensão de saída é desconhecida. Um miliamperímetro colocado em série no circuito indicou uma corrente de 0,75mA. Qual a tensão na saída da fonte?

Solução :

$$V = R \text{ x } I = 22000 \text{ x } 0,00075 = 16,5\text{V}$$

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Como se obtém o valor da corrente que circula em um circuito ?

2. Que instrumentos medem a corrente CC em um circuito ?

BIBLIOGRAFIA

SENAI/Departamento Nacional. **Lei de Ohm**, Rio de Janeiro, Divisão de Ensino e Treinamento, 1980, 91p (Módulo Instrucional: Eletricidade-Eletrotécnica,5)

VAN VALKENBURG, NOOGER & NEVILLE. **Eletricidade Básica**. 15.ª ed. São Paulo, Freitas Bastos, 1970, v.2.

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Adequar a formação profissional que ministra em suas diversas modalidades, notadamente a aprendizagem, às novas demandas do desenvolvimento da indústria e das demais empresas de categoria econômicas sob sua jurisdição, é uma diretriz do *SENAI*.

Introdução

Em muitas situações da vida prática de quem trabalha com manutencão de equipamentos elétricos faz-se necessária a medição da corrente elétrica que circula em partes de um circuito. A partir desta informação pode-se identificar inúmeros problemas de mal funcionamento de certos componentes eletrônicos. Os instrumentos utilizados para estas medições são os amperímentros, miliamperímetros e microamperímetros.

Este fascículo, que abordará a medição de corrente contínua, foi elaborado com o objetivo de troná-lo apto a medir esta grandeza elétrica.

Para ter sucesso no desenvolvimento do conteúdo e atividades deste fascículo, o leitor já deverá ter conhecimentos relativos a:

- Corrente elétrica.

Medição de corrente contínua

A medição de corrente contínua consiste na utilização correta de um instrumento com o objetivo de determinar a intensidade da corrente que flui em um circuito.

INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO DA INTENSIDADE DA CORRENTE

A intensidade da corrente que flui entre dois pontos pode ser medida através de:

- Amperímetros, miliamperímetros ou microamperímetros.
- Multímetros.

AMPERÍMETROS, MILIAMPERÍMETROS E MICROAMPERÍMETROS

São instrumentos simples destinados à medição da intensidade da corrente. Dependendo da estimativa do valor que será medido, escolhe-se um dos três tipos. A **Fig.1** mostra um amperímetro (A), um miliamperímetro (mA) e um microamperímetro (μA).

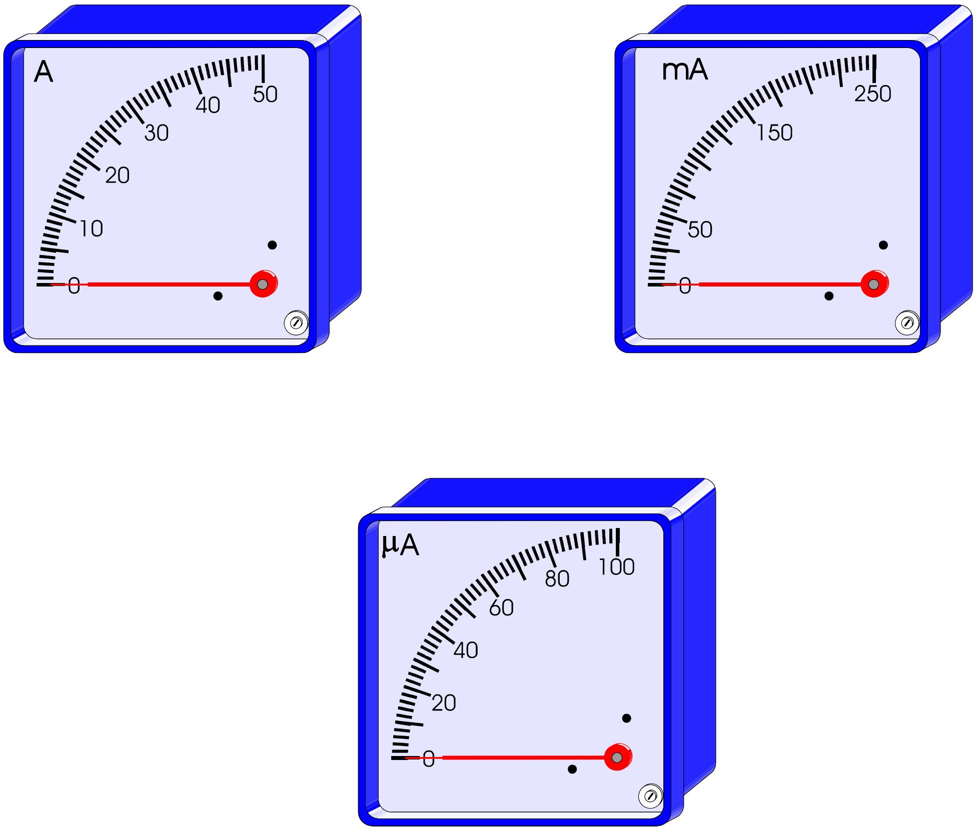


Fig.1 Amperímetro, miliamperímetro e microamperímetro típicos.

Os medidores de corrente contínua são indicados pelo símbolo ∩ como ilustrado na Fig. 2.

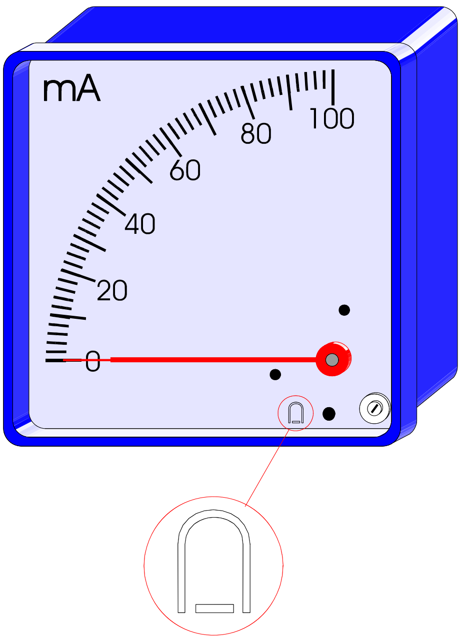


Fig.2 Medidores de corrente contínua.

Os medidores de corrente CC têm polaridade definida para ligação (como os voltímetros de CC). Os bornes na parte posterior são identificados pelos sinais + e -, como mostrado na **Fig.3**.

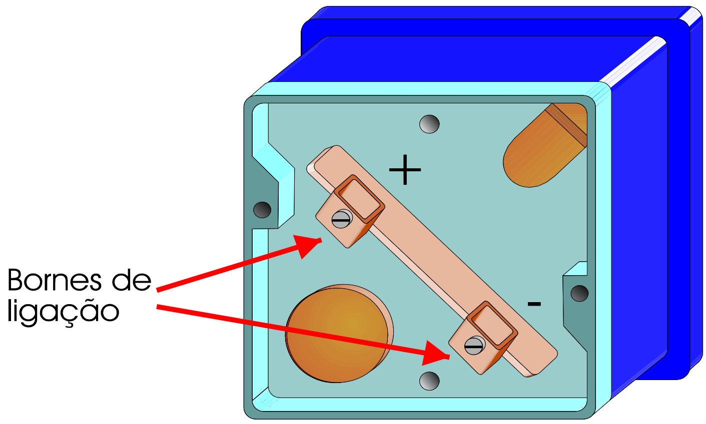


Fig.3 Localização dos bornes de ligação em um medidor de corrente CC.

CONEXÃO DO MEDIDOR

Os instrumentos de medição da corrente elétrica devem ser conectados de forma que a corrente circule através do medidor. Para que isto ocorra, o circuito deve ser interrompido e o instrumento deve ser colocado nos pontos de interrupção. A **Fig.4** ilustra o procedimento para medição de corrente em um circuito.

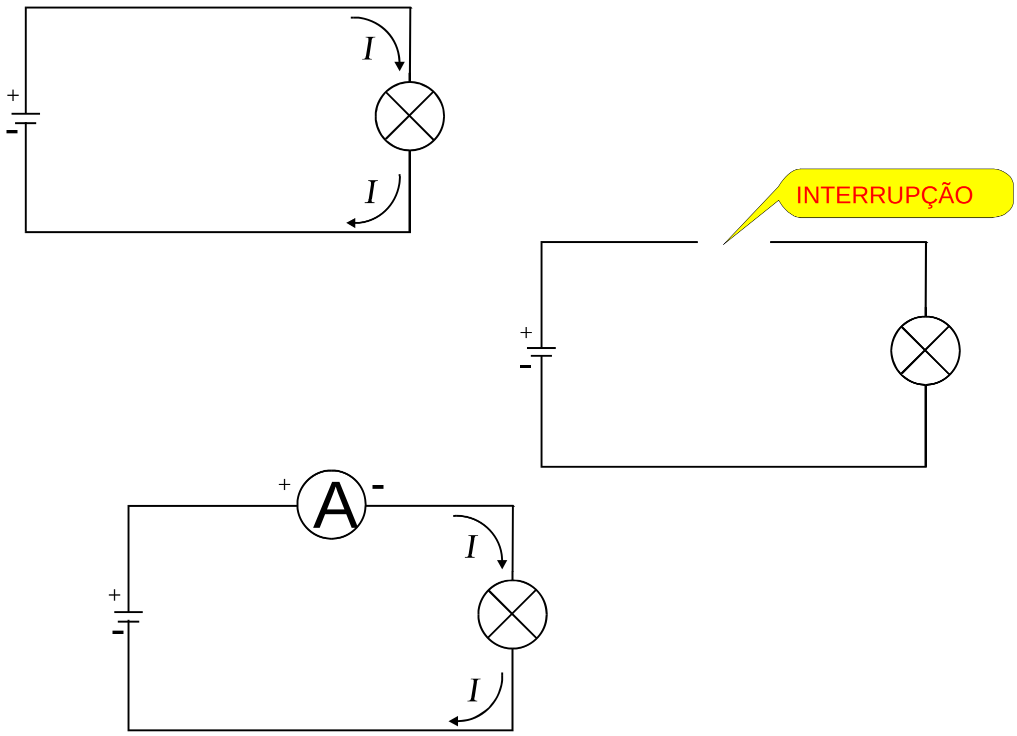
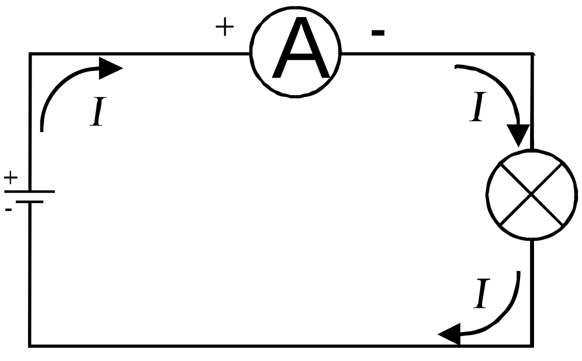


Fig.4 Procedimento para a medição de corrente.

Observando o circuito, verifica-se que na medição de intensidade de corrente o medidor fica em série com os consumidores do circuito.

Nos circuitos simples, compostos por uma fonte geradora e um consumidor, o instrumento pode ser colocado em qualquer posição do circuito, como mostrado na **Fig.5**.



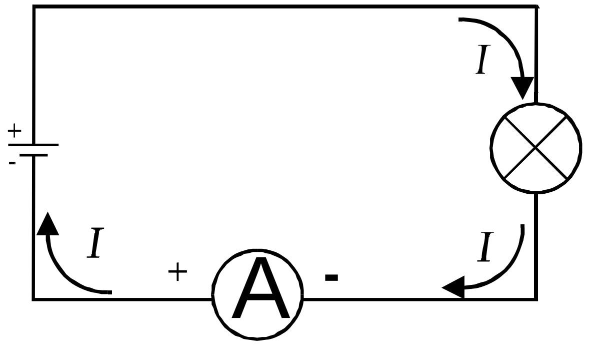


Fig.5 Possíveis posições do amperímetro em um circuito.

Os amperímetros dos circuitos da **Fig.5** fornecem a mesma indicação, porque a corrente que circula após a lâmpada é a mesma que circula antes dela.

Para realizar a conexão do instrumento no circuito, a fonte de alimentação deve ser desligada e a polaridade de ligação deve ser observada cuidadosamente. O instrumento deve ser conectado de forma que a corrente entre através do borne positivo (pelo sentido convencional da corrente elétrica).

MEDIÇÃO DA INTENSIDADE DA CORRENTE ELÉTRICA CONTÍNUA COM MULTÍMETRO

Os multímetros dispõem de algumas posições na chave seletora e algumas escalas destinadas à medição de intensidade de corrente.

A **Fig.6** mostra o painel de um multímetro, ressaltando as posições da chave seletora e as escalas utilizadas para a medição de corrente.

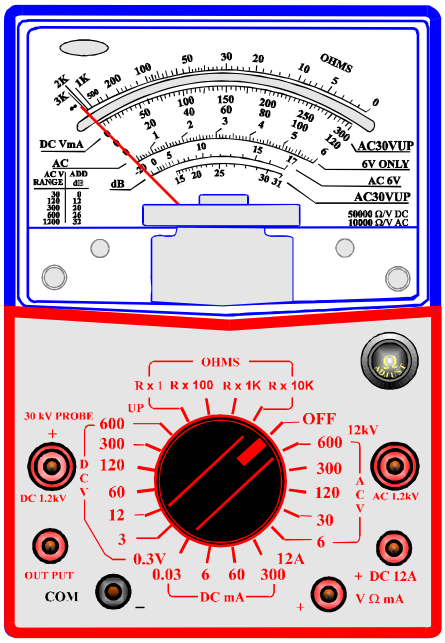


Fig.6 Painel de um multímetro.

BORNES

Os bornes para a colocação das pontas de prova para medição de corrente CC normalmente são os mesmos utilizados para as medições de tensão, como indicado na **Fig.7**.

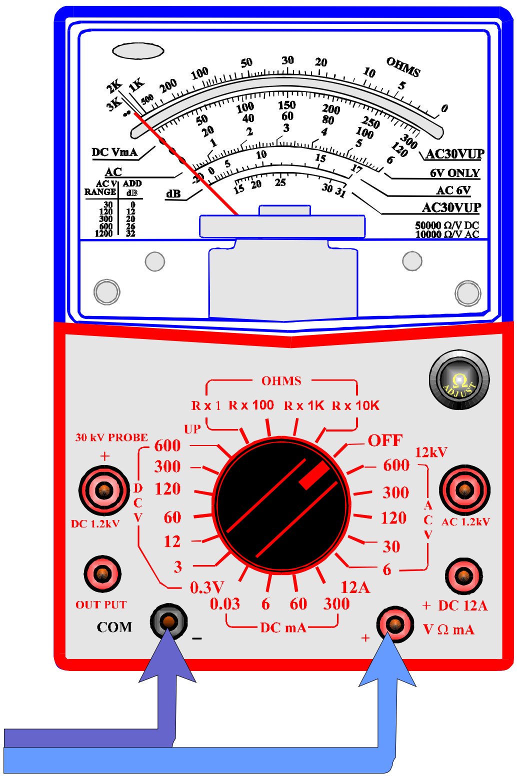


Fig.7 Bornes para medicão de corrente cc.

POSIÇÕES DA CHAVE SELETORA

As posições da chave seletora que são destinadas à medição de intensidade da corrente são indicadas pela abreviatura DC mA, como pode visto na **Fig.8**.

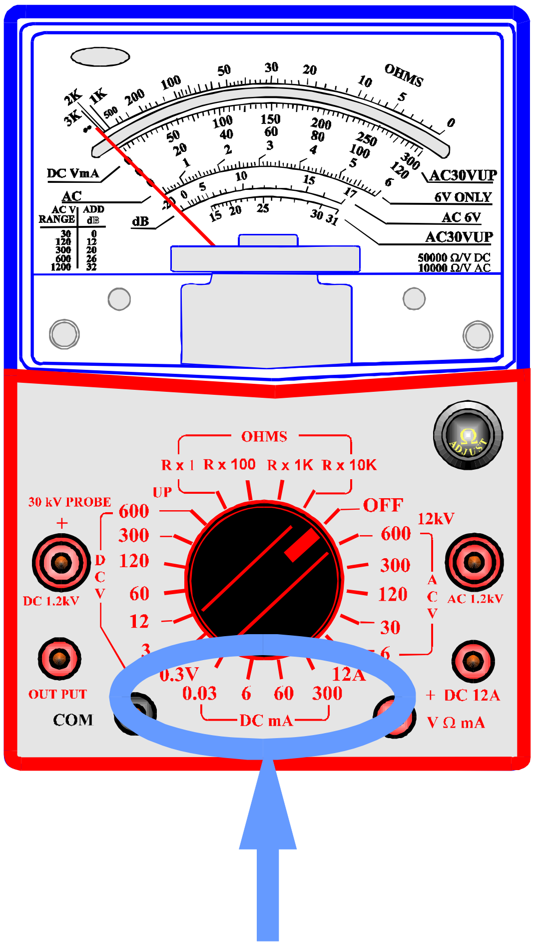


Fig.8 Posições da chave seletora para medição de corrente DC.

As posições da chave seletora destinadas à medição da intensidade da corrente são indicadas pela abreviatura DC mA.

Convém ressaltar que também para as medições de intensidade de corrente, o valor indicado pela chave seletora é o máximo que o instrumento pode medir nesta posição da chave, como indicado na **Fig.9**.

No exemplo da **Fig.9**, a intensidade da corrente máxima que o instrumento pode medir com a chave seletora nesta posição é de 60mA.

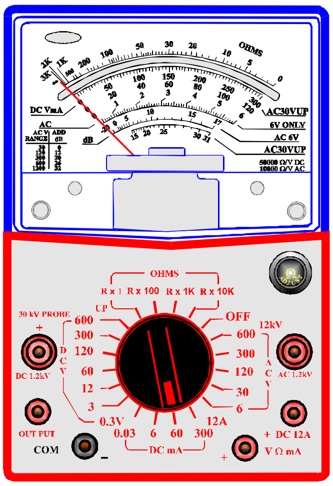


Fig.9 Indicação da corrente máxima de 60mA.

ESCALAS

As escalas destinadas à medição da intensidade da corrente elétrica são as mesmas usadas para a medição de tensão contínua, como mostrado na **Fig.10**.

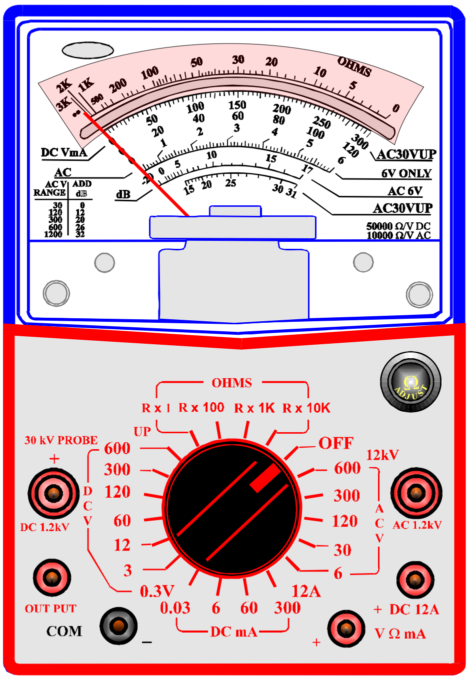


Fig.10 Escalas para a medição de intensidade de corrente.

PROCEDIMENTO PARA MEDIÇÃO DA INTENSIDADE DA CORRENTE COM O MULTÍMETRO

A utilização do multímetro para medição de corrente deve seguir um procedimento definido, visando à preservação do instrumento e à precisão da medição.

CONEXÃO DAS PONTAS DE PROVA

Conectam-se as pontas de prova aos bornes **-** ou comum (ponta de prova **preta**) e DCV ou **+** (ponteira **vermelha**), como mostrado na **Fig. 11**.

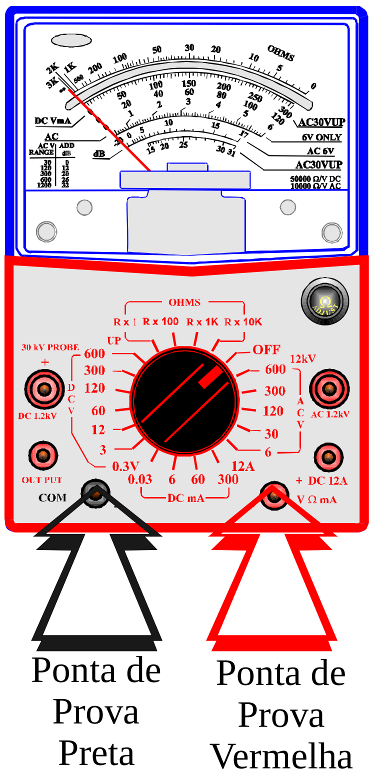


Fig.11 Conexão das pontas de prova preta e vermelha.

SELEÇÃO DA ESCALA

O posicionamento da chave seletora para uma das escalas de medição de correntes deve ser feita com base em uma estimativa do valor existente no ponto a ser medido. **Seleciona-se sempre uma escala com limite superior ao valor estimado**.

Se o valor a ser medido é completamente desconhecido não se deve realizar a medição. Nas escalas de corrente, um erro de posicionamento da chave seletora provoca danos irreparáveis ao instrumento.

CONEXÃO DO MULTÍMETRO AO CIRCUITO

O procedimento de conexão do multímetro ao circuito para a medição da intensidade da corrente é o mesmo dos miliamperímetros convencionais.

- Desliga-se a alimentação.
- Interrompe-se o circuito.
- Conecta-se o instrumento, observando as polaridades.

A corrente deve entrar no multímetro pela ponta de prova vermelha (sentido convencional da corrente), como mostrado na **Fig.12**.

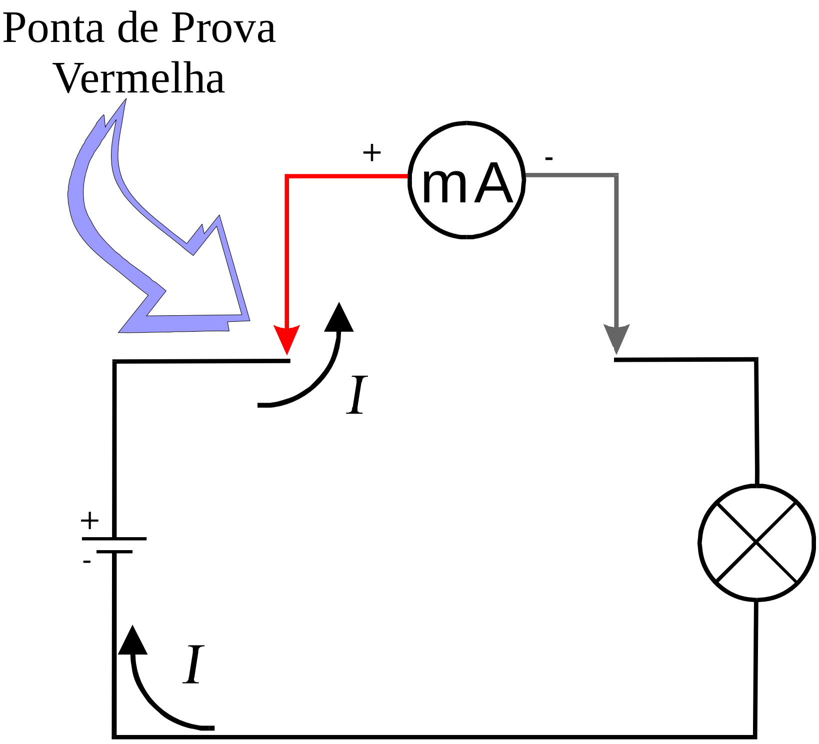


Fig.12 Posição correta da ponta de prova vermelha.

LEITURA DAS ESCALAS

A leitura das escalas de corrente é feita da mesma forma que a leitura de tensão. O valor da corrente é determinado pela posição do ponteiro e pela posição da chave seletora.

Quando a chave seletora está na posição DC mA 300, a leitura é feita na escala de 0 a 300, como indicado na **Fig.13**.

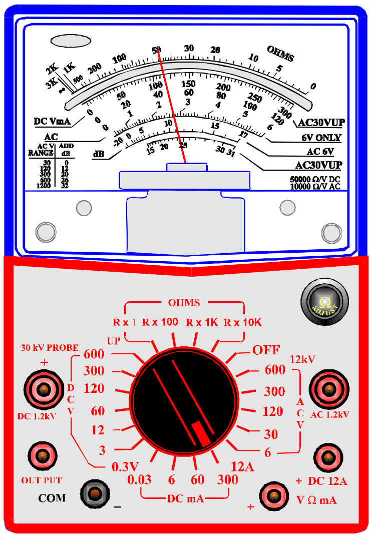


Fig.13 Chave seletora na posição DC mA 300.

Quando a chave seletora está na posição DC mA 60, a leitura é feita na escala de 0 a 6 e o valor encontrado é multiplicado por 10, como mostrado na **Fig.14**.

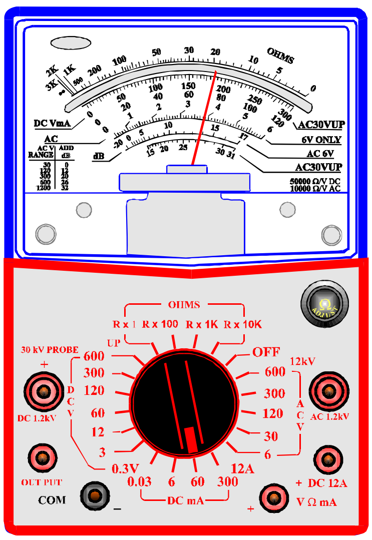


Fig.14 Chave seletora na posição DC mA 60.

Quando a chave seletora está na posição DC mA 6, a leitura é feita diretamente na escala de 0 a 6, conforme mostrado na **Fig.15**.

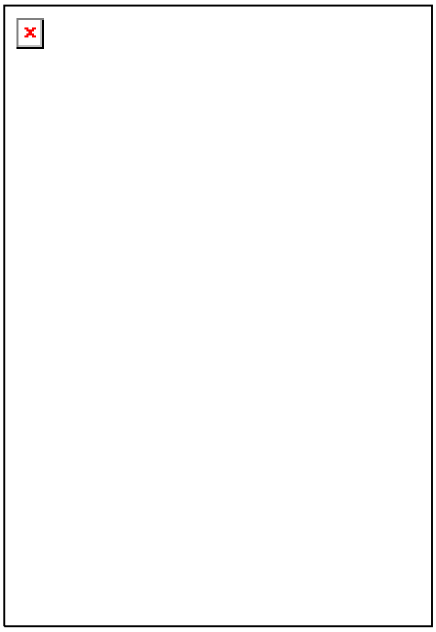


Fig.15 Chave seletora na posição DC mA 6.

Quando a chave seletora está na posição DC mA 0,03 (ou seja 30µA), a leitura é feita na escala de 0 a 300 e o valor encontrado é dividido por 10, como indicado na **Fig.16**.

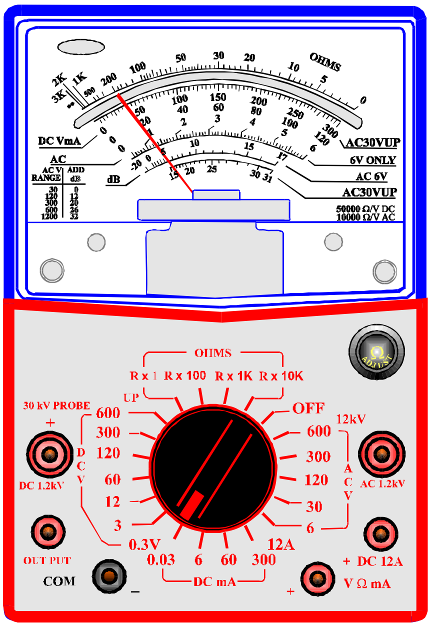


Fig.16 Chave seletora na posição DC mA 0,03

Deve-se observar que esta leitura resulta em microampère.

CUIDADOS APÓS A UTILIZAÇÃO

Uma vez encerrada a utilização, o multímetro não deve ser guardado com a chave seletora nas posições de medidas de corrente. Deve-se colocar o seletor na posição desligado (OFF) ou para a escala elevada de tensão (por exemplo 1000V).

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Como se obtém o valor da corrente que circula em um circuito ?

2. Que instrumentos medem a corrente CC em um circuito ?

BIBLIOGRAFIA

SENAI/ Departamento Nacional. **Lei de Ohm** Rio de Janeiro, Divisão de Ensino e Treinamento, 1980, 91p (Módulo Instrucional: Eletricidade-Eletrotécnica,5)

VAN VALKENBURG, NOOGER & NEVILLE. **Eletricidade Básica**. 15.ª ed. São Paulo, Freitas Bastos, 1970, v.2.

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Integração – Fortalecer o trabalho em equipe é essencial para a consecução dos objetivos e satisfação dos clientes externos e internos.

Introdução

Existem conceitos da física que estão presentes no nosso dia a dia e aos quais nos referimos, mesmo sem que tenhamos um conhecimento mais profundo. Assim acontece, por exemplo, quando procuramos um aparelho de som e optamos por um de maior potência ou ao escolher uma lâmpada optamos por uma de menor potência para **gastar** menos energia.

O conceito de potência está ligado ao nosso dia a dia à idéia de força, produção de som, calor, luz e até mesmo ao consumo de energia.

Para sua melhor compreensão do conceito de potência a partir da energia elétrica, e sua aplicação na vida prática, foi elaborado este fascículo, que tratará de potência elétrica em corente contínua, visando capacitá-lo a determinar a potência dissipada por uma carga ligada a uma fonte de energia elétrica.

Estudando este fascículo com atenção, o leitor estará caminhando para uma utilização mais consciente deste conceito.

Para ter sucesso no desenvolvimento do conteúdo e atividades deste fascículo, o leitor já deverá ter conhecimentos relativos a:

- Resistores.
- Lei de Ohm.

Potência elétrica em CC.

A passagem da corrente elétrica através de uma carga instalada em um circuito elétrico produz efeitos tais como calor, luz e movimento. **A Fig.1** mostra alguns exemplos.

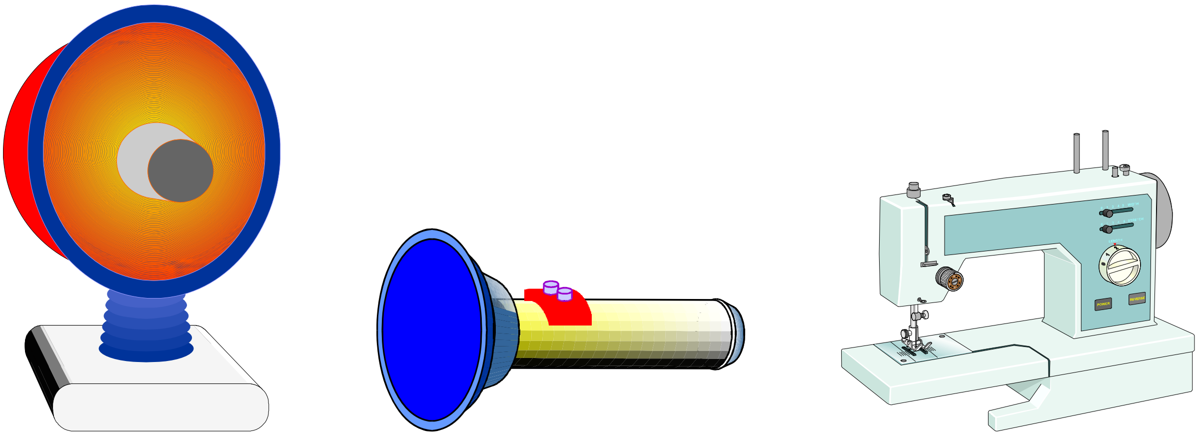


Fig.1 Exemplos de alguns efeitos produzidos pela corrente elétrica.

O calor, a luz e o movimento produzido pelo consumidor a partir da energia elétrica é denominado de **trabalho**.

A capacidade de cada consumidor de produzir trabalho em um determinado tempo a partir da energia elétrica é denominada potência elétrica.

O conhecimento da potência elétrica de cada componente em um circuito é muito importante para que se possa dimensioná-lo corretamente.

TRABALHO ELÉTRICO

Os circuitos elétricos são montados com o objetivo de realizar um aproveitamento da energia elétrica. Entre os efeitos que se pode obter a partir da energia elétrica, citam-se:

EFEITO CALORÍFICO

Nos fogões elétricos, chuveiros e aquecedores a energia elétrica é convertida em calor. A **Fig.2** mostra como exemplo o aquecedor.

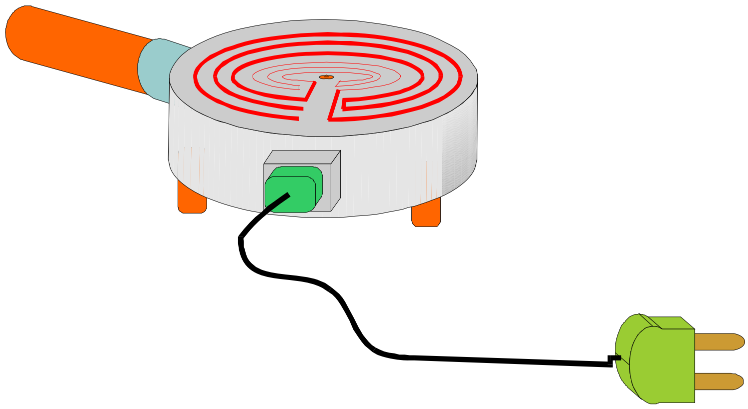


Fig.2 Aquecedor elétrico.

EFEITO LUMINOSO

Nas lâmpadas, como a da **Fig.3**, a energia elétrica é convertida em luz (e também uma parcela em calor).

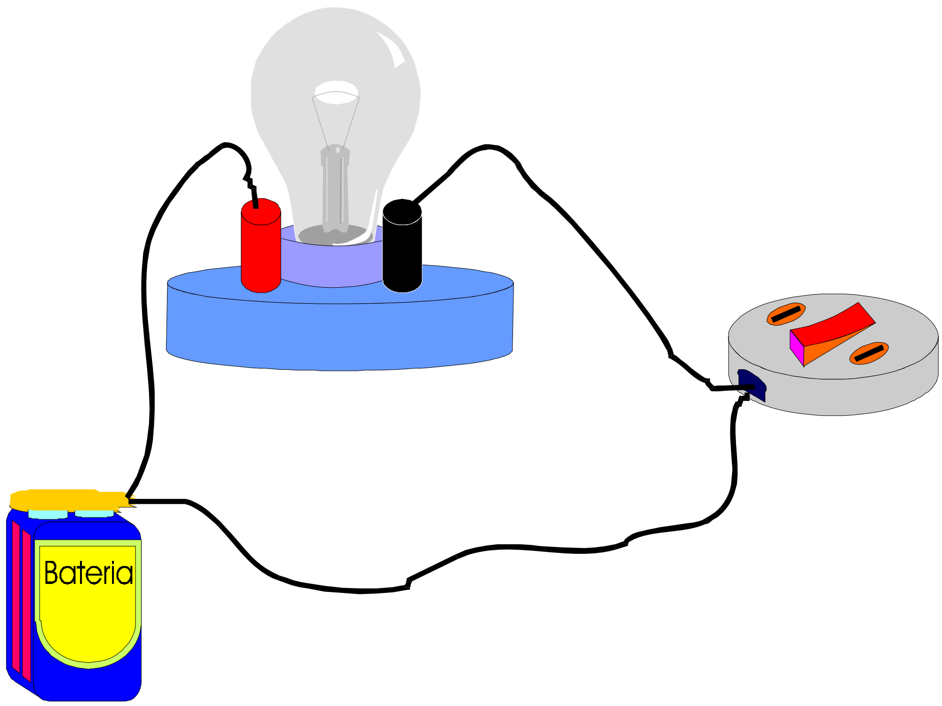


Fig.3 Lâmpada elétrica.

EFEITO MECÂNICO

Os motores convertem energia elétrica em força motriz (movimento). A **Fig.4** mostra um exemplo da conversão de energia elétrica em energia mecânica.

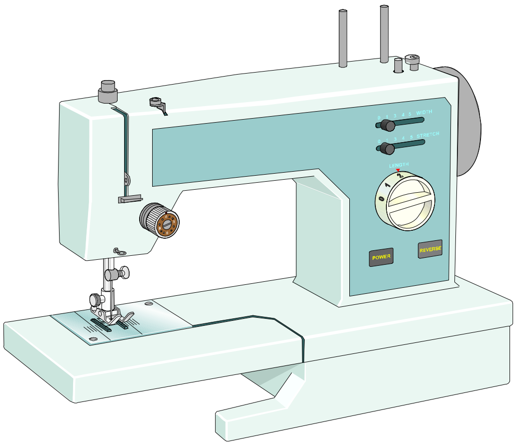


Fig.4 Motor elétrico.

Este trabalho de transformação da energia elétrica em outra forma de energia é realizado pelo consumidor ou carga. Ao transformar a energia elétrica em outra forma de energia, o consumidor realiza um **trabalho elétrico**.

POTÊNCIA ELÉTRICA

Analisando um tipo de carga em particular, como por exemplo, a lâmpada, verificar-se que nem todas produzem a mesma quantidade de luz. Existem lâmpadas que produzem grandes quantidades de luz e outras que produzem pequenas quantidades.

Da mesma forma, existem aquecedores capazes de ferver um litro d’água em 10 minutos e outros que podem fazê-lo em 5 minutos. Tanto um aquecedor como o outro realizam o mesmo trabalho elétrico: aquecer um litro d’água até a temperatura de 100ºC. Entretanto, um deles é mais rápido, realizando o trabalho em menor tempo.

A partir desta afirmação, conclui-se que os dois aquecedores não são iguais.

Existe uma grandeza elétrica através da qual se relaciona o trabalho elétrico realizado e o tempo necessário para sua realização. Esta grandeza é denominada de **potência elétrica.**

Potência elétrica é a capacidade de realizar trabalho na unidade de tempo a partir da energia elétrica.

A partir disso, pode-se afirmar :

- Lâmpadas que produzem quantidades diferentes de luz são de potências diferentes.
- Aquecedores que levam tempos diferentes para ferver uma mesma quantidade de água são de potências diferentes.

O mesmo acontece em relação a outros tipos de consumidores, tais como motores, aquecedores etc.

Existem motores de grande potência (como os dos elevadores) e de pequena potência (como os dos gravadores de fita cassete).

A potência elétrica é uma grandeza e como tal pode ser medida. A unidade de medida da potência elétrica é o watt, representada pelo símbolo W.

A unidade de medida de potência elétrica é o watt.

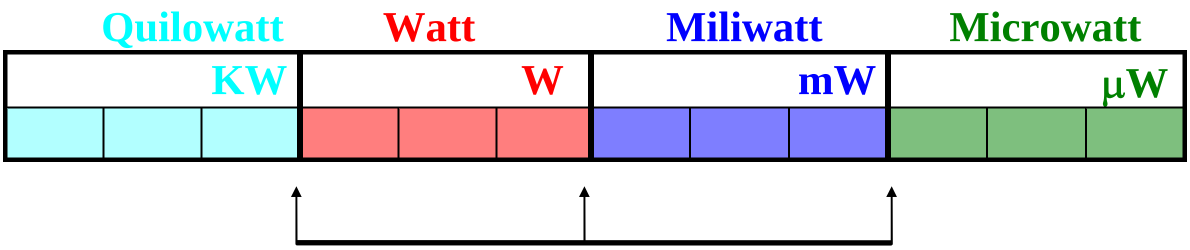
Esta unidade é definida da seguinte forma: 1W é o trabalho realizado em um segundo por um consumidor alimentado por uma tensão de 1V pelo qual circula uma corrente de 1A.

A unidade de medida da potência elétrica watt tem múltiplos e submúltiplos. A **Tabela 1** apresenta os múltiplos e submúltiplos usuais do watt.

Tabela 1 Múltiplos e submúltiplos do watt.

Denominação		Símbolo	Valor em relação ao watt
Múltiplos	Quilowatt	KW	10^3 W ou 1.000 W
Unidade	Watt	W	1 W
Submúltiplos	Miliwatt	mW	10^{-3} W ou 0,001 W
	Microwatt	μW	10^{-6} W ou 0,000001 W

Para a conversão de valores, usa-se o mesmo sistema de outras unidades.



Posição da vírgula

Apresenta-se a seguir alguns exemplos de conversão:

1) 1,3W é o mesmo que 1300mW.
2) 640mW é o mesmo que 0,64W.
3) 0,007W é o mesmo que 7mW.
4) 350W é o mesmo que 0,35kW
5) 2,1kW é o mesmo que 2100W.
6) 12mW é o mesmo que 12000μW.

Determinação da potência e um consumidor em CC.

A potência elétrica de um consumidor, representada pela letra *P*, depende da tensão aplicada e da corrente que circula nos seus terminais.

Matematicamente, a potência de um consumidor é dada por:

$$P = V \times I \qquad (1)$$

onde *V* é a tensão entre os terminais do consumidor e *I* a corrente circulante no mesmo.

Exemplo 1:

Uma lâmpada de lanterna de 6V solicita uma corrente de 0,5A das pilhas. Qual a potência da lâmpada?

Dados : $V = 6\text{V}$ $I = 0{,}5\text{V}$

Solução :

$$P = V \times I$$
$$P = 6 \times 0{,}5 = 3\text{W}$$

De forma semelhante à Lei de Ohm, a equação da potência pode ser colocada em triângulo, como mostrado na **Fig.5**.

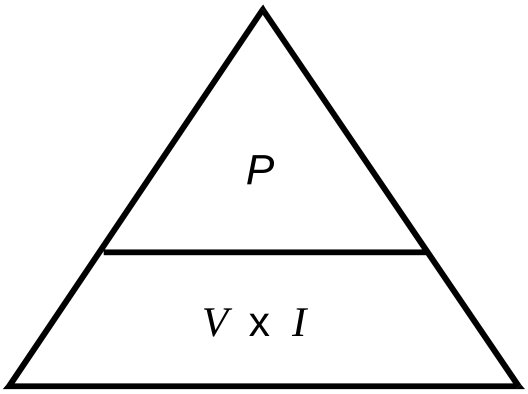


Fig.5 Triângulo para cálculo da potência

Assim, obtém-se facilmente as equações de corrente para o cálculo de qualquer das três grandezas da equação:

$P = V \times I$ $\Leftarrow$ Cálculo da potência quando se dispõe da tensão e da corrente.

$I = \dfrac{P}{V}$ $\Leftarrow$ Cálculo da corrente quando se dispõe da potência e da tensão.

$V = \dfrac{P}{I}$ $\Leftarrow$ Cálculo da tensão quando se dispõe da potência e da corrente.

As equações devem ser usadas com os valores nas unidades padrão de medidas (V, A, W).

Em muitas ocasiões, faz-se necessário calcular a potência de um componente e não se dispõe da tensão ou da corrente.

Não dispondo da tensão (*V*), não é possível calcular a potência pela **Eq.(1)**

Essa dificuldade pode ser solucionada com o auxílio da Lei de Ohm da seguinte forma :

1. Coloca-se lado a lado os dois triângulos, como mostrado na **Fig.6**

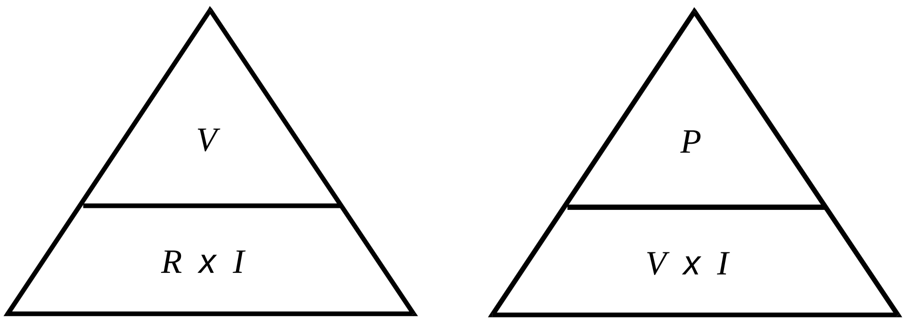


Fig.6 Triângulo da Lei de Ohm e da potência.

2. Através dos dados fornecidos pelo problema (*I* e *R*) e da Lei de Ohm, obtém-se a tensão aplicada ao consumidor:

$$V = R \times I \qquad (2)$$

Substituindo o valor de V da **Eq.(2)** (Lei de Ohm) na **Eq.(1)** (equação da potência), têm-se:

$$P = V \times I \;\Rightarrow\; P = (R \times I) \times I = R \times I^2 \qquad (3)$$

Esta equação pode ser usada para determinar a potência de um componente e é conhecida como equação da potência por efeito Joule.

O mesmo tipo de dedução pode ser realizado para obter-se uma equação que permita determinar a potência a partir da tensão e resistência.

pela Lei de Ohm : $I = \dfrac{V}{R}$

Substituindo o valor de I da **Eq.(2)** (Lei de Ohm) na **Eq.(1)** (equação da potência), têm-se:

$$P = V \times I \;\Rightarrow\; P = V \times \left(\frac{V}{R}\right) = \frac{V^2}{R}$$

As equações para determinação da potência podem ser colocadas nos triângulos para facilitar as sua utilizações, como ilustrado na **Fig.7**.

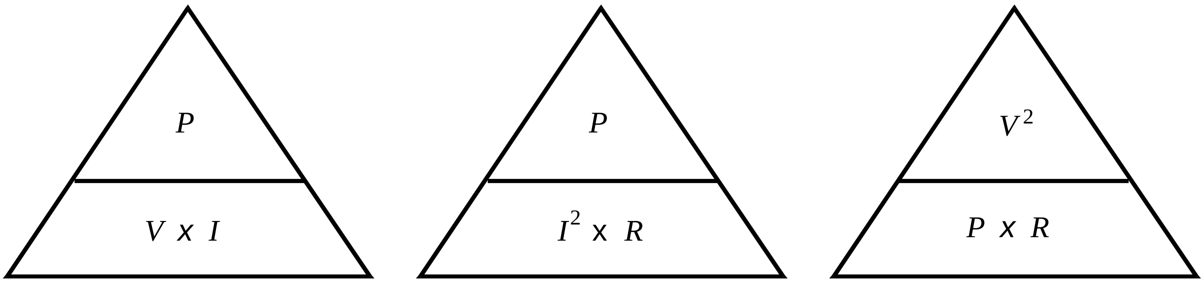


Fig.7 Triângulos para o cálculo da potência

A seguir estão apresentados alguns exemplos que ilustram a utilidade das equações para a determinação da potência.

<u>Exemplo 2</u>:

Um aquecedor elétrico tem uma resistência se 8Ω e solicita uma corrente de 10A. Qual é a sua potência?

<u>Dados</u> : $I = 10\ \text{A}$ $\quad R = 8\ \Omega$

<u>Solução</u> :

$$P = R \times I^2 = 8 \times 10^2 = 800\text{W}$$

<u>Exemplo 3</u>:

Um isqueiro de um automóvel funciona com $12V_{cc}$ fornecidos pela bateria. Sabendo-se que a resistência do isqueiro é de 3Ω, calcular a potência dissipada.

<u>Dados</u> : $V = 12\ V_{cc}$ $\quad R = 3\ \Omega$

<u>Solução</u> :

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{12^2}{3} = 48\text{W}$$

Potência nominal

Alguns aparelhos elétricos, tais como chuveiros, lâmpadas e motores apresentam uma característica particular: são aparelhos que têm uma tensão estabelecida para o funcionamento.

Assim, existem chuveiros para 110V ou 22V, lâmpadas para 6V, 12V, 110V, 220V e outras tensões e os motores são encontrados para tensões tais como 110V, 220V, 380V e outras.

Esta tensão para a qual estes consumidores são fabricados é chamada de **tensão nominal de funcionamento.**

Os consumidores que apresentam estas características devem sempre ser ligados na tensão correta (nominal), que normalmente está especificada no seu corpo, como ilustrado na **Fig.8**

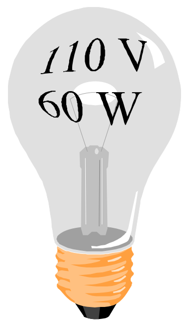


Fig.8 Indicação de tensão de funcionamento

Quando estes aparelhos são ligados corretamente, a quantidade de calor, luz ou movimento produzida é exatamente aquela para a qual foram projetados.

Por exemplo, uma lâmpada de 110V e 60W ligada corretamente, produz 60W entre luz e calor. Diz-se, neste caso, que a lâmpada esta **dissipando sua potência nominal.**

Portanto, **potência nominal** é a potência para qual um consumidor foi projetado. Uma lâmpada, um aquecedor ou um motor trabalhando **dissipando a potência nominal**, estão na sua condição ideal de funcionamento.

LIMITE DE DISSIPAÇÃO DE POTÊNCIA

Existe um grande número de componentes eletrônicos que se caracterizam por não ter uma tensão nominal de funcionamento especificada. Estes componentes podem funcionar com os mais diversos valores de tensão.

Os resistores são um exemplo típico deste tipo de componentes. Não trazem nenhuma referência quanto a tensão nominal de funcionamento.

Entretanto, todo o resistor que é ligado a uma fonte geradora dissipa uma potência que pode ser calculada.

Tomando-se como exemplo o circuito apresentado na **Fig.9**.

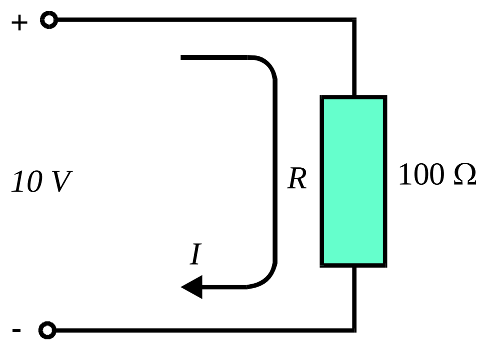


Fig.9 Potência dissipada em um resistor

A potência dissipada é:

$$P = V \times I = 10\text{V} \times 0{,}1\text{A}$$
$$P = 1\text{W}$$

Como o resistor não produz luz ou movimento, esta potência é dissipada em forma de calor, o que é constatado pelo aquecimento do componente.

Os resistores dissipam potência elétrica em forma de calor.

É necessário garantir que a quantidade de calor produzida pelo resistor não seja demasiada, provocando um aquecimento tão grande que possa destruí-lo.

Dessa forma, conclui-se que se a dissipação de potência for limitada, a produção de calor também será.

Por essa razão, os resistores têm uma característica denominada de **limite de dissipação** que estabelece um valor máximo de potência que o resistor pode dissipar sem sofrer danos.

O limite de dissipação de um resistor é a potência máxima que ele pode dissipar sem sofrer danos.

Os resistores são fabricados em diversos valores de limite de dissipação. Entre os valores mais comuns de limites de dissipação, encontram-se:

1/8W ou 0,125W, 1/4W ou 0,25W, 1/2W ou 0,5W, 1W, 2W, 5W, 10W e outros.

Deve-se sempre ter em mente que estes valores representam o **limite máximo de dissipação.**

Por medida de segurança à preservação do componente, deve-se manter a potência dissipada no componente **abaixo** de 50% do valor limite. Isto deve permitir que o componente trabalhe morno. Se for necessário que o componente trabalhe frio, usa-se no máximo 30% da potência nominal. Por exemplo, para um resistor de 470Ω/1W, tem-se que este resistor trabalha no limite de dissipação quente se ele estiver dissipando 1W, trabalha morno se estiver dissipando 0,5W e trabalha frio se estiver dissipando até 0,3W.

Os resistores para diferentes limites de dissipação têm tamanhos diferentes, como pode ser visto na **Fig.10**.



Fig.10 Resistores de diferentes limites de dissipação.

Sempre que for necessário solicitar ou comprar um resistor, é necessário fornecer a sua especificação completa (por exemplo, resistor de 820Ω, com 10% de tolerância e 1/2W de potência).

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Como se define potência elétrica e qual a sua unidade de medida.
2. Quais as equações básicas para o cálculo da potência elétrica ?
3. O que se entende por limite de dissipação mínima de um resistor ?

BIBLIOGRAFIA

SENAI/Departamento Nacional. **Potência em C.C**. Rio de Janeiro, Divisão de Ensino e Treinamento, 1980, 79p (Módulo Instrucional: Eletricidade - Eletrotécnica, 7).

VAN VALKENBURG, NOOGER & NEVILLE. **Eletricidade Básica**. 15.ª ed. São Paulo, Freitas Bastos, 1970, vol.2.

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Melhoria da Qualidade – Buscar constantemente a melhoria do desempenho no trabalho, visando à excelência dos resultados.

Introdução

Os circuitos eletrônicos em geral se caracterizam por se constituírem de vários componentes, todos funcionando simultaneamente. Ao abrir um rádio portátil, por exemplo, podem-se observar quantos componentes são necessários para que se possa obter o som. Assim é para a grande maioria dos equipamentos eletrônicos.

Ao ligar um aparelho, a corrente flui por muitos caminhos, e a tensão fornecida pela fonte de energia se distribui pelos diversos componentes. Esta distribuição de corrente e tensão obedece fundamentalmente a duas leis: as **Leis de Kirchhoff**.

Para que se possa compreender a distribuição das correntes e tensões em circuitos como o de um rádio portátil, primeiro é necessário estudar e compreender essa distribuição em circuitos simples, formados apenas por resistores, lâmpadas etc. Para isso, foi elaborado este fascículo que tratará das Leis de Kirchhoff .

Para ter sucesso no desenvolvimento do conteúdo e atividades deste fascículo, o leitor já deverá ter conhecimentos relativos a:

- Associação de resistores.
- Lei de Ohm.

Primeira Lei de Kirchhoff

A primeira Lei de Kirchhoff refere-se à forma como a corrente se distribui nos circuitos paralelos, como mostrado na **Fig.1**.

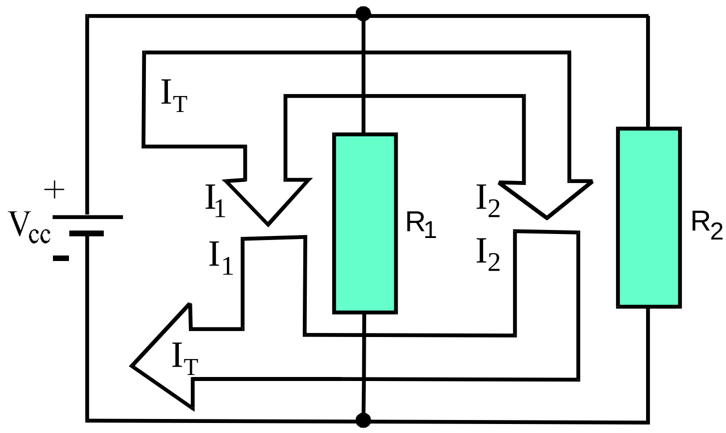


Fig.1 Distribuição da corrente em um circuito paralelo.

Através da primeira Lei de Kirchhoff e da Lei de Ohm, pode-se determinar a corrente em cada um dos componentes associados em paralelo.

O conhecimento e compreensão da primeira Lei de Kirchhoff é indispensável para a manutenção e projeto de circuitos eletrônicos.

CARACTERÍSTICAS DO CIRCUITO PARALELO

Os circuitos paralelos apresentam algumas características particulares, cujo conhecimento é indispensável para a compreensão da primeira Lei de Kirchhoff. Essas características podem ser analisadas, tomando-se como ponto de partida o circuito da **Fig.2.**

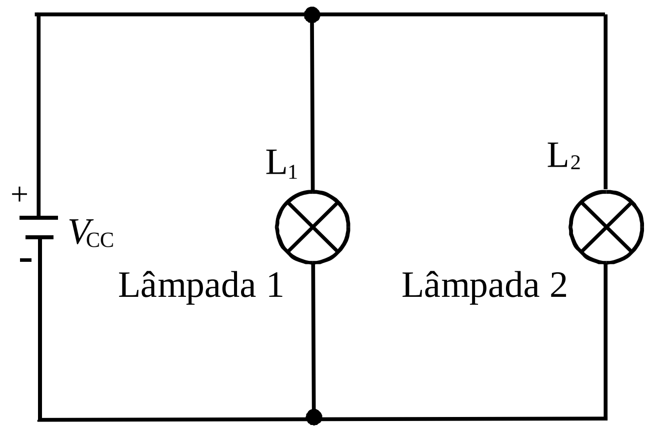


Fig.2 Exemplo de circuito paralelo.

Observando-se o circuito, verifica-se que tanto a lâmpada 1 como a lâmpada 2 têm um dos terminais ligado diretamente ao pólo positivo da fonte de alimentação e o outro ligado ao pólo negativo.

Ligadas dessa forma, cada uma das lâmpadas (L_1 e L_2) está diretamente conectada à fonte de alimentação recebendo a mesma tensão nos seus terminais, como mostrado na **Fig**.**3**.

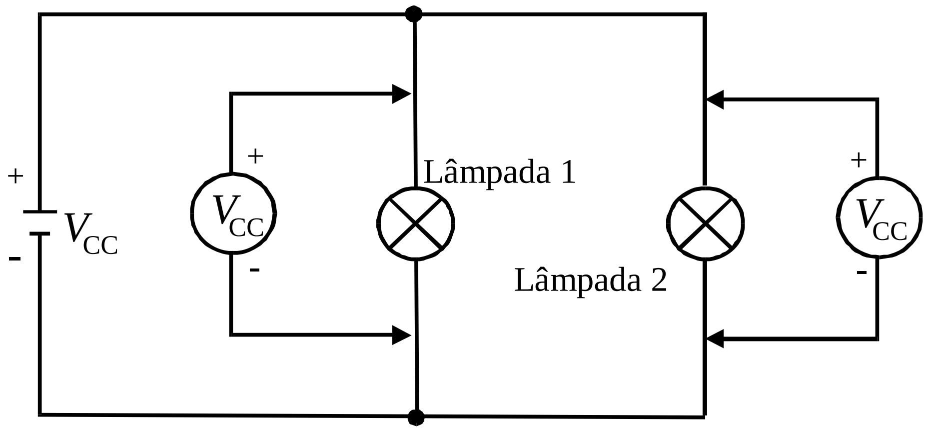


Fig.3 Cada lâmpada submetida à mesma tensão V_{cc} .

Em um circuito paralelo, a tensão sobre os componentes associados é a mesma.

A função da fonte de alimentação nos circuitos é fornecer a corrente elétrica necessária para o funcionamento dos consumidores.

Quando um circuito possui apenas uma fonte de alimentação, a corrente fornecida por esta fonte é denominada de **corrente total**, representada pela notação I_T nos esquemas, como mostrado na **Fig.4**.

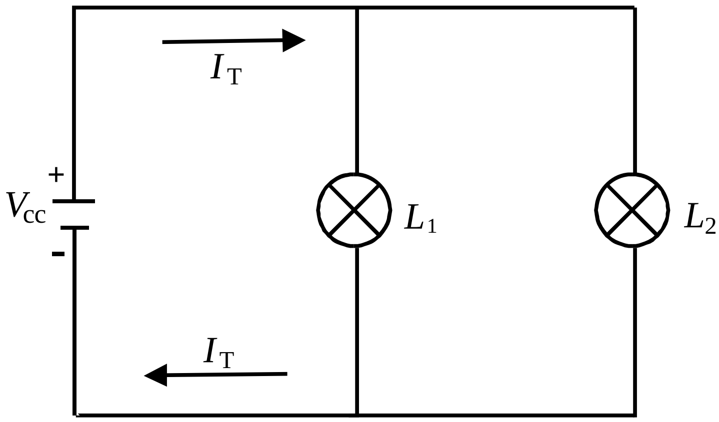


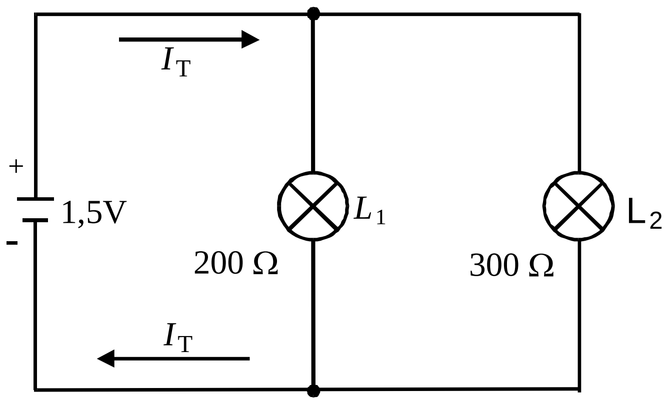
Fig.4 Ilustração de corrente total em um circuito paralelo.

Para a fonte de alimentação, não é importante se os consumidores são lâmpadas, resistores ou aquecedores. A corrente que a fonte fornece (I_T) depende apenas, segundo a Lei de Ohm, da sua tensão (V_T) e da resistência total (R_T) que os consumidores apresentam, ou seja :

$$I_T = \frac{V_T}{R_T} \tag{1}$$

<u>Exemplo 1</u>:

Determinar a corrente total no circuito da figura abaixo.



<u>Solução</u> :

$$R_T = \frac{R_{L_1} \times R_{L_2}}{R_{L_1} + R_{L_2}} = \frac{200 \times 300}{200 + 300} = 120\Omega$$

Portanto, a corrente total é:

$$I_T = \frac{V}{R_T} = \frac{1{,}5}{120} = 0{,}0125\text{A}$$

Esse valor de corrente circula em toda a parte do circuito que é comum às duas lâmpadas.

A partir do nó (no terminal positivo da pilha) a corrente total I_T divide-se em duas partes, conforme ilustrado na **Fig**.**5**.

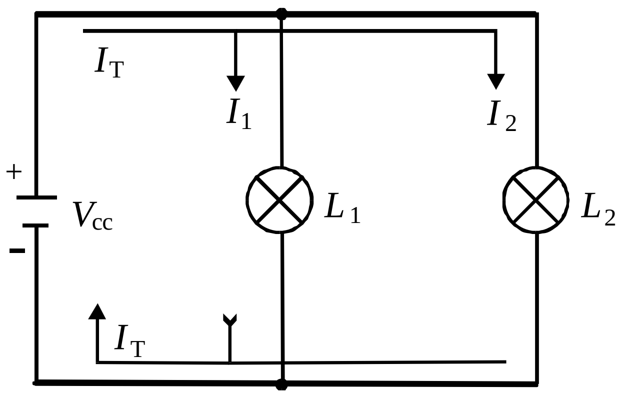


Fig.**5** Divisão da corrente total em correntes parciais.

Essas correntes são chamadas de **correntes parciais** e podem ser denominadas de I_1 (para a lâmpada L_1) e I_2 (para a lâmpada L_2).

A forma como a corrente I_T se divide a partir do nó depende unicamente das resistências das lâmpadas. A lâmpada de menor resistência permitirá a passagem de uma maior parcela da corrente.

Pode-se afirmar que a corrente I_1 na lâmpada L_1 (de menor resistência) será maior que a corrente I_2 na lâmpada L_2 , como pode ser visto na **Fig**.**6**.

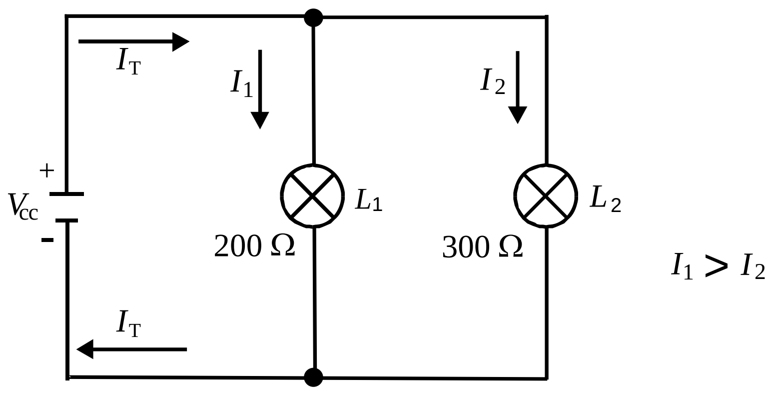
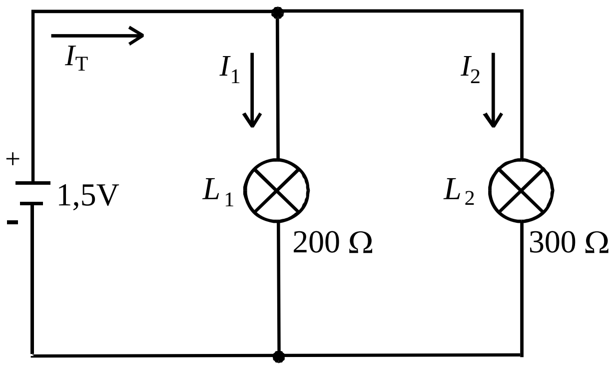


Fig.**6** Divisão da corrente total através das lâmpadas.

O valor da corrente que circula em cada ramal pode ser calculada através da Lei de Ohm, uma vez que se conhece a tensão aplicada e a resistência de cada lâmpada.

Exemplo 2:

Determinar o valor da corrente que circula em cada lâmpada e a corrente total do circuito da figura abaixo.



Solução :

Lâmpada 1

$$I_1 = \frac{V_{L_1}}{R_{L_1}} = \frac{1,5}{200} = 0,0075\ \text{A} \qquad\qquad I_1 = 7,5\,\text{mA}$$

Lâmpada 2

$$I_2 = \frac{V_{L_2}}{R_{L_2}} = \frac{1,5}{300} = 0,005\ \text{A} \qquad\qquad I_2 = 5\,\text{mA}$$

Observando-se os valores das correntes no nó, verifica-se que as correntes que saem, somadas, originam um valor igual ao da corrente que entra.

Essa afirmativa é válida para qualquer nó de um circuito elétrico, sendo conhecida como a primeira Lei de Kirchhoff.

Primeira Lei de Kirchhoff : A soma das correntes que chegam a um nó é igual à soma das que dele saem.

A primeira Lei de Kirchhoff é muito útil para se determinar um valor desconhecido de corrente quando se dispõe dos demais valores de corrente que chegam ou saem de um nó.

De modo resumido, pode-se então afirmar que o circuito paralelo apresenta duas características fundamentais:

- Fornece mais de um caminho para a circulação da corrente elétrica.
- A tensão em todos os componentes associados é a mesma.

Segunda Lei de Kirchhoff

A segunda Lei de Kirchhoff se refere à forma como a tensão se distribui nos circuitos série, como por exemplo, o mostrado na **Fig.7**.

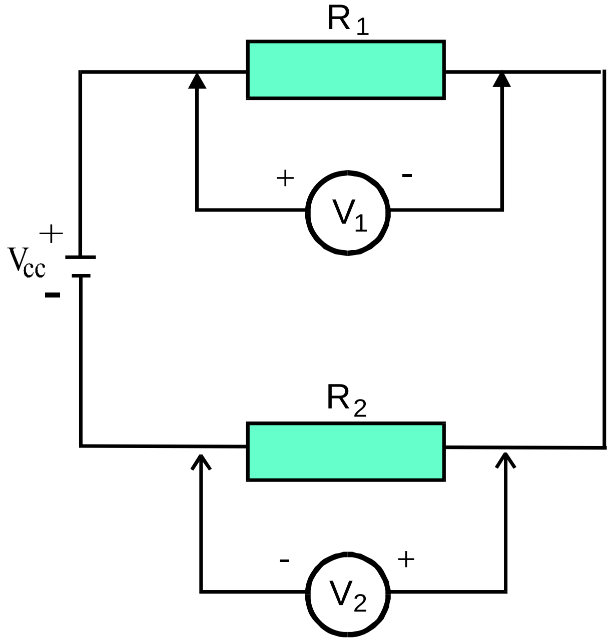


Fig.7 Distribuição da tensão em um circuito série.

O conhecimento e compreensão da segunda Lei de Kirchhoff é importante porque é aplicada a todos os circuitos com componentes associados em série.

CARACTERÍSTICAS DOS CIRCUITOS SÉRIE

Os circuitos série têm características particulares cujo conhecimento é indispensável para a compreensão da segunda Lei de Kirchhoff.

Tomando como referência um circuito simples, com duas cargas ligadas em série, essas características podem ser identificadas. A **Fig.8** mostra esse circuito.

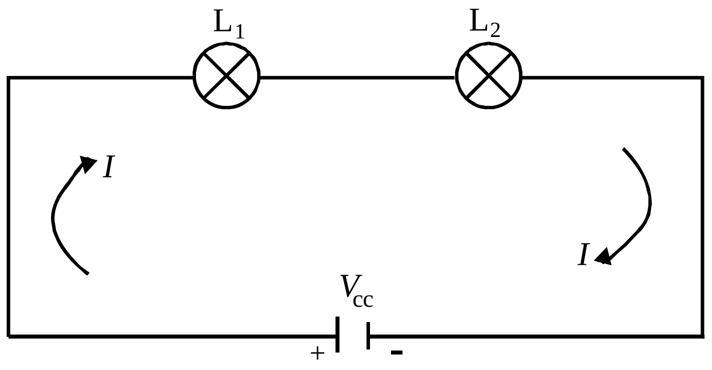


Fig.8 Exemplo de circuito série.

O circuito série se caracteriza por possibilitar um caminho único para a circulação da corrente elétrica.

Como existe um único caminho, a mesma corrente que sai do pólo positivo da fonte passa através da lâmpada L_1 , da lâmpada L_2 e retorna à fonte pelo pólo negativo.

Isto significa que um medidor de corrente (amperímetro), pode ser colocado em qualquer parte do circuito. Em qualquer uma das posições, o valor indicado pelo instrumento será o mesmo, como indicado na **Fig.9**.

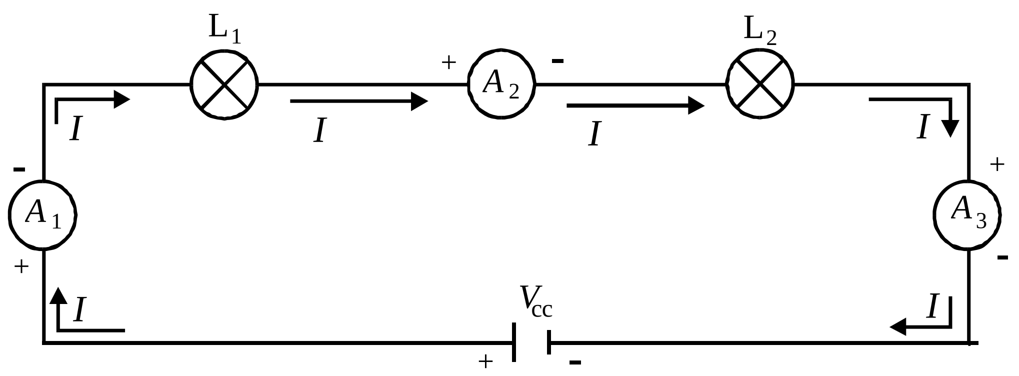


Fig.9 Medição de corrente em um circuito série.

A intensidade da corrente é a mesma ao longo de todo o circuito série.

Por essa razão, a corrente que circula em um circuito série é designada simplesmente pela notação I.

A forma de ligação das cargas, uma após a outra, dá ao circuito outra característica importante, como pode ser visto na **Fig.10**. Caso uma das lâmpadas (ou qualquer outro tipo de carga) seja retirada do circuito, ou tenha o seu filamento rompido, o circuito elétrico fica aberto e a corrente cessa.

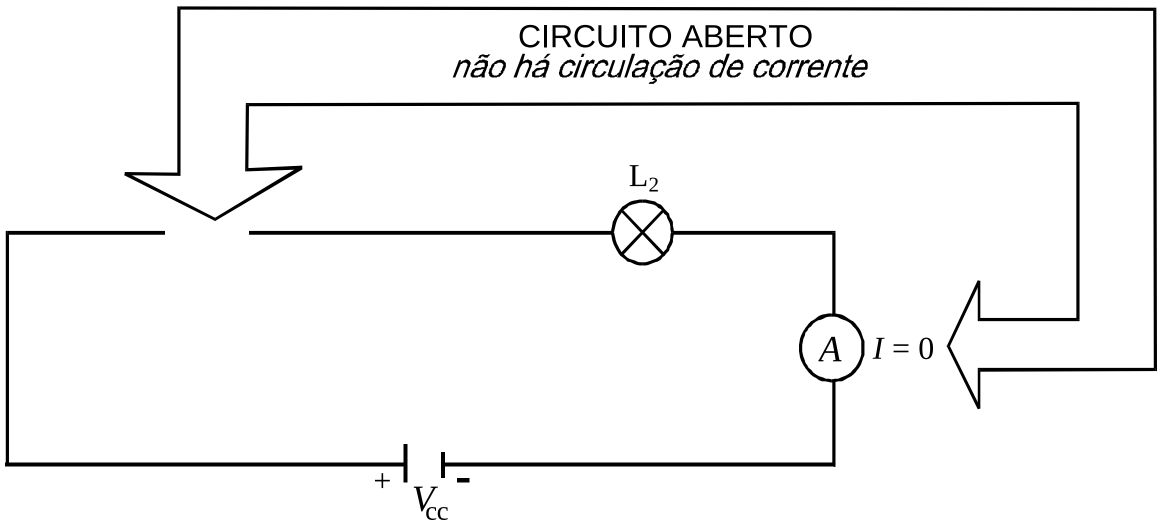


Fig.10 Circuito série aberto.

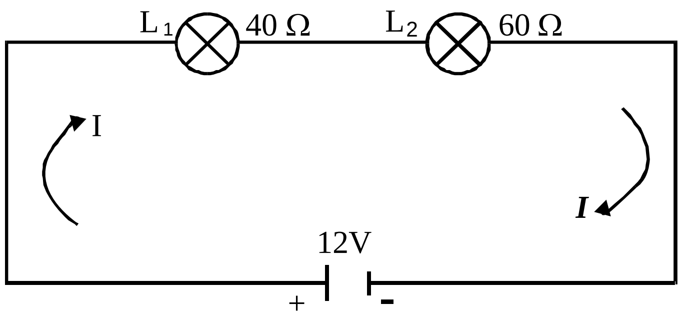
Em um circuito série, o funcionamento de cada um dos componentes depende do restante.

O circuito série apresenta três características importantes : (1) fornece apenas um caminho para a circulação da corrente elétrica; (2) a corrente tem o mesmo valor em qualquer ponto do circuito e (3) o funcionamento de cada consumidor depende do restante.

A corrente que circula em um circuito série cujo valor é único ao longo de todo o circuito, pode ser determinada com o auxílio da Lei de Ohm. Para determinar a corrente no circuito série através da Lei de Ohm, deve-se usar a tensão nos terminais da associação e a sua resistência total.

Exemplo 3:

Determinar a corrente no circuito da figura abaixo.



Solução :

$$I = \frac{V}{R} = \frac{12}{100} = 120\,\text{mA}$$

Pelo fato de não estarem com os dois terminais ligados diretamente à fonte, a tensão nos componentes de um circuito série é diferente da tensão da fonte de alimentação. O valor da tensão em cada um dos componentes é sempre menor do que a tensão de alimentação. Esta parcela da tensão que fica sobre cada componente do circuito é denominada de **queda de tensão** no componente. A queda de tensão é representada pela notação **V**, como ilustrado na **Fig**.11.

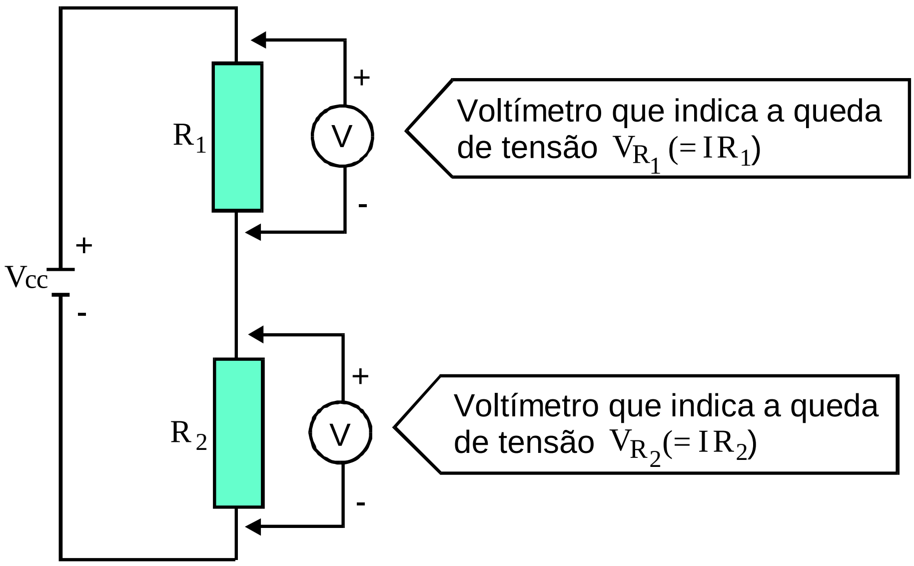
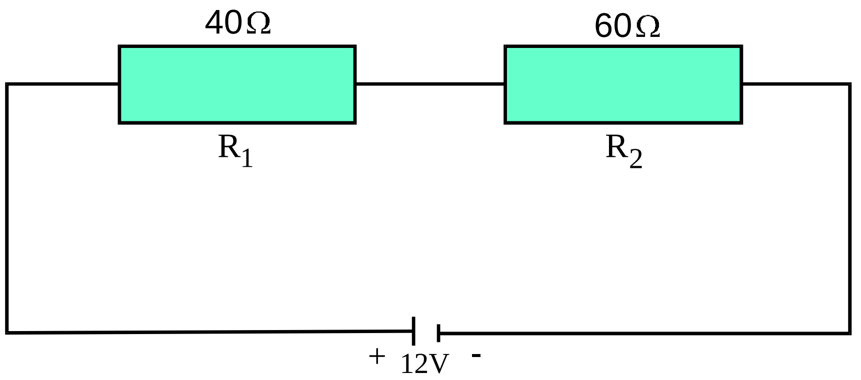


Fig.11 Queda de tensão nos componentes R_1 e R_2.

A queda de tensão em cada componente de uma associação série pode ser determinada pela Lei de Ohm, quando se dispõe da corrente no circuito e dos seus valores de resistência.

Exemplo 4:

Determinar a queda de tensão nos resitores R_1 e R_2 da figura abaixo.



Solução :

$$I = \frac{V}{R_T} = \frac{12}{40 + 60} = 0{,}12 \text{ A}$$

$$V_{R_1} = I_{R_1} \times R_1 = 0{,}12 \times 40 = 4{,}8 \text{ V}$$

$$V_{R_2} = I_{R_2} \times R_2 = 0{,}12 \times 60 = 7{,}2 \text{ V}$$

Observando-se os valores de resistência e queda de tensão, verifica-se que:

- O resistor de maior valor fica com uma parcela maior de tensão.
- O resistor de menor valor fica com a menor parcela de tensão.

Pode-se dizer que, em um circuito série, a queda de tensão é proporcional ao valor do resistor, ou seja :

- Maior valor do resistor, maior queda de tensão.
- Menor valor do resitor, menor queda de tensão.

SEGUNDA LEI DE KIRCHHOFF

Tomem-se como referência os valores de tensão nos resistores do circuito do Exemplo 4.

Somando-se as quedas de tensão naqueles dois resistores, tem-se : 4,8V + 7,2V = 12V. Verifica-se que o resultado da soma é a tensão de alimentação.

A segunda Lei de Kirchhoff é baseada nesta conclusão.

***Segunda Lei de Kirchhoff* : A soma das quedas de tensão nos componentes de uma associação série é igual à tensão aplicada nos seus terminais extremos.**

A segunda Lei de Kirchhoff é utilizada com muita freqüência como “ferramenta” para se determinarem quedas de tensão desconhecidas em circuitos eletrônicos.

LEIS DE KIRCHHOFF E OHM EM CIRCUITOS MISTOS

As Leis de Kirchhoff, juntamente com a lei de Ohm, permitem que se determinem as tensões ou correntes em cada um dos componentes de um circuito misto, como mostrado na **Fig.12**.

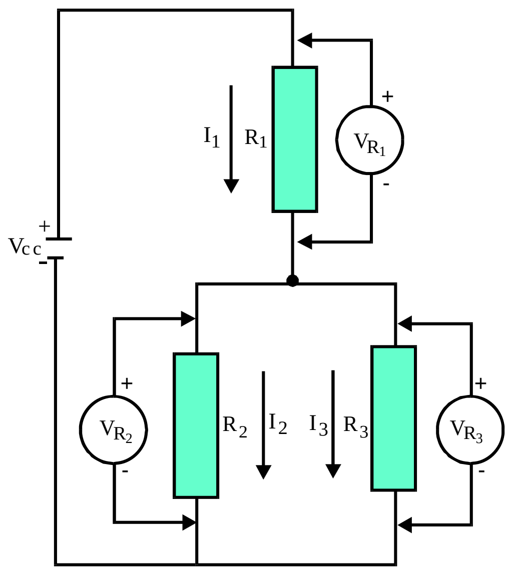


Fig.12 Exemplo de um circuito misto para o cálculo das tensões e correntes.

Os valores elétricos de cada componente do circuito podem ser determinados a partir da execução da seqüência de procedimentos a seguir:

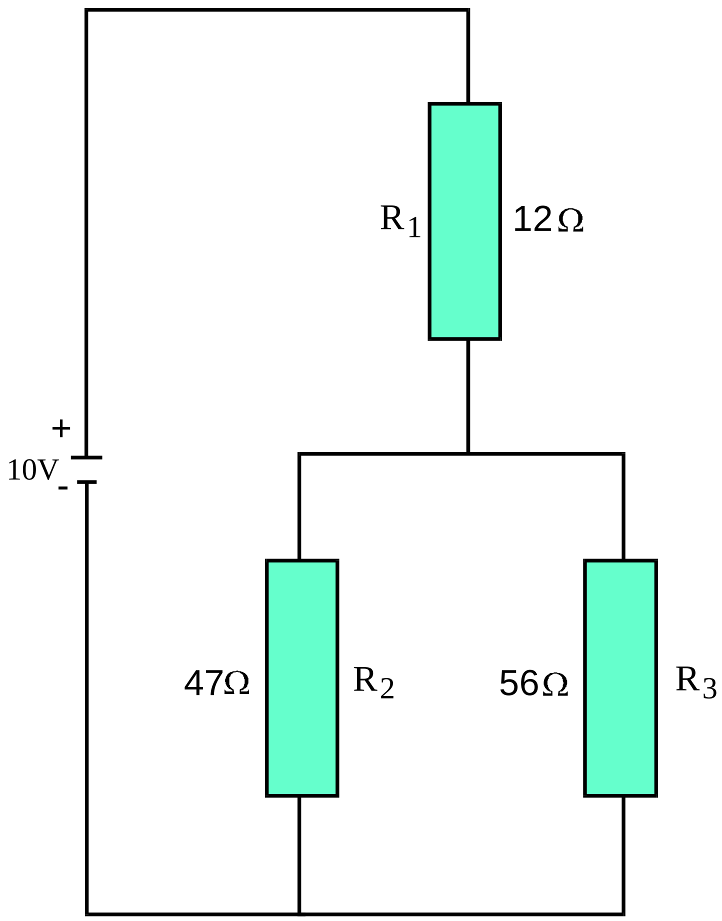
- Determinação da resistência equivalente.
- Determinação da corrente total.
- Determinação das tensões ou correntes nos elementos do circuito.

A utilização da seqüência de procedimentos será demonstrada a partir dos seguintes exemplos :

Exemplo 5:

Para o circuito da figura abaixo, determinar :

a) A resistência equivalente.
b) A corrente total.
c) As tensões e as correntes individuais.

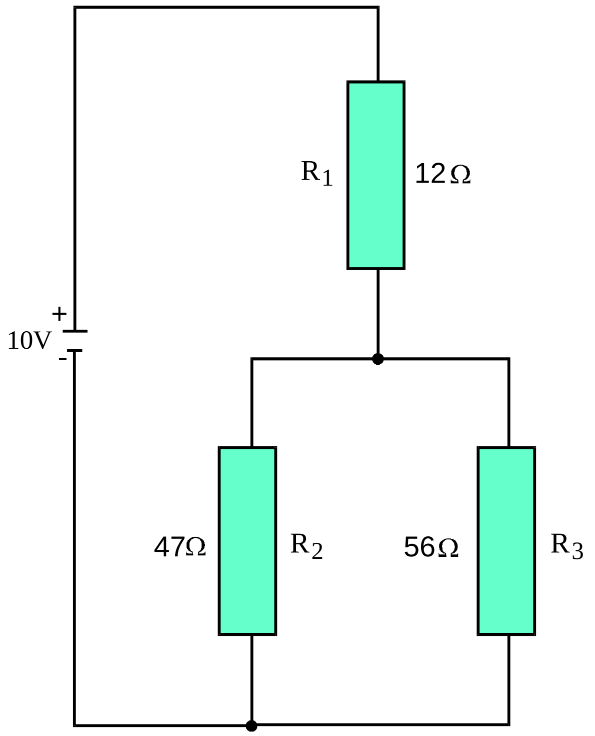


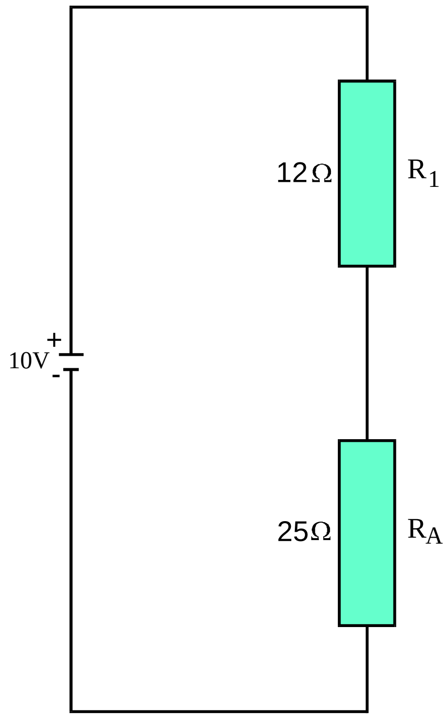
Solução :

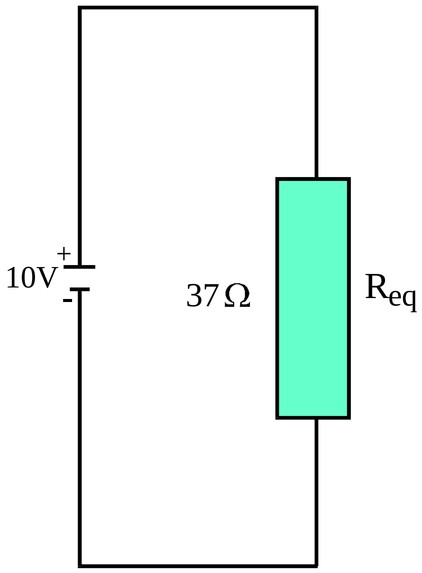
a) Determinação da resistência equivalente :

Para se determinar a resistência equivalente (R_{eq}) do circuito, empregam-se “circuitos parciais” através dos quais o circuito original é reduzido e simplificado até a forma de um único resistor.

As figuras abaixo mostram os circuitos utilizados para a determinação da resistência equivalente.



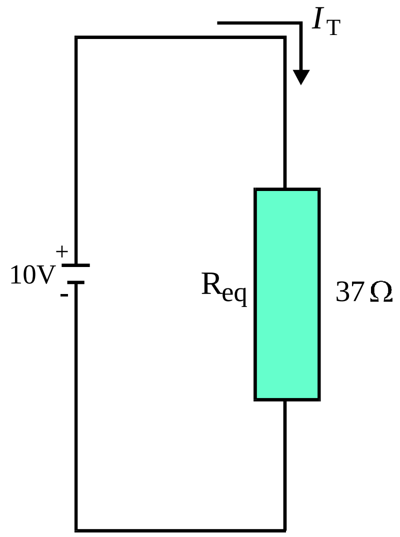




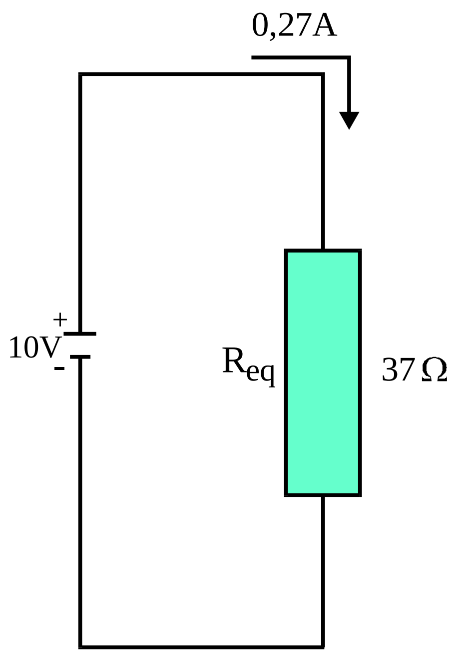
b) Determinação da corrente total :

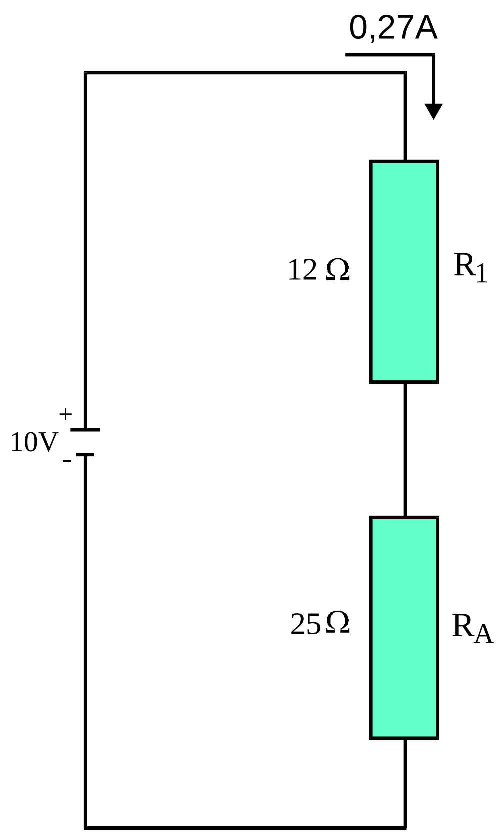
A corrente total pode ser determinada aplicando-se a Lei de Ohm no circuito equivalente final, mostrado na figura abaixo.

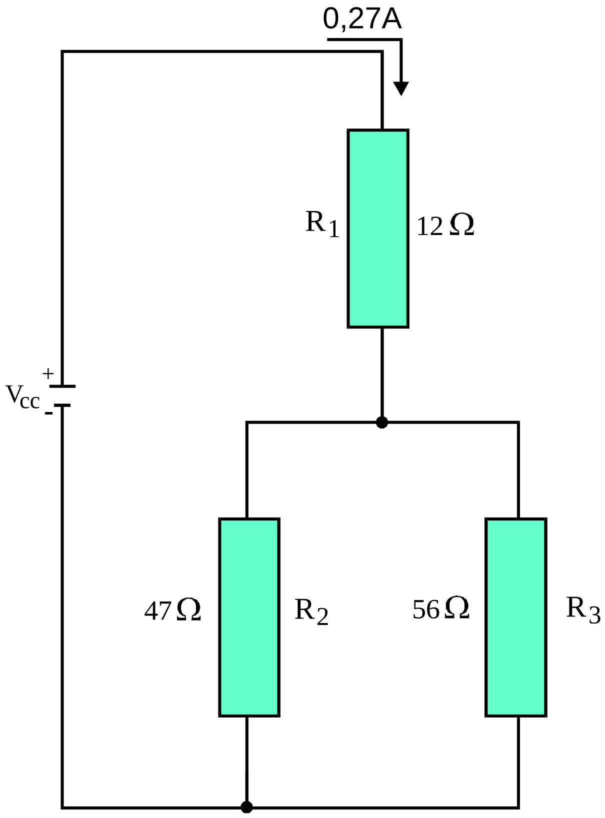
$$I = \frac{V}{R_{eq}} = \frac{10}{37} = 0{,}27\ \text{A}$$



Uma vez que o circuito equivalente final é uma representação simplificada do circuito original (e do parcial) a corrente calculada também é válida para estes circuitos, conforme mostra a seqüência das figuras abaixo.







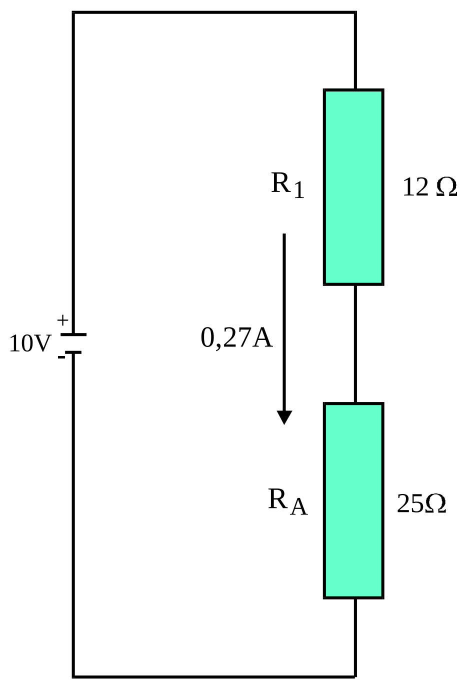
c) Determinação das tensões e correntes individuais :

A corrente total aplicada ao "circuito parcial" permite que se determine a queda de tensão no resistor R_1, como mostra a figura abaixo.

$$V_{R_1} = I_{R_1} \times R_1$$

$$V_{R_1} = 0{,}27 \times 12$$

$$V_{R_1} = 3{,}243\ \text{V}$$



A queda de tensão em R_A pode ser determinada pela 2.ª Lei de Kirchhoff (a soma das quedas de tensão em um circuito série é igual à tensão de alimentação) ou pela Lei de Ohm.

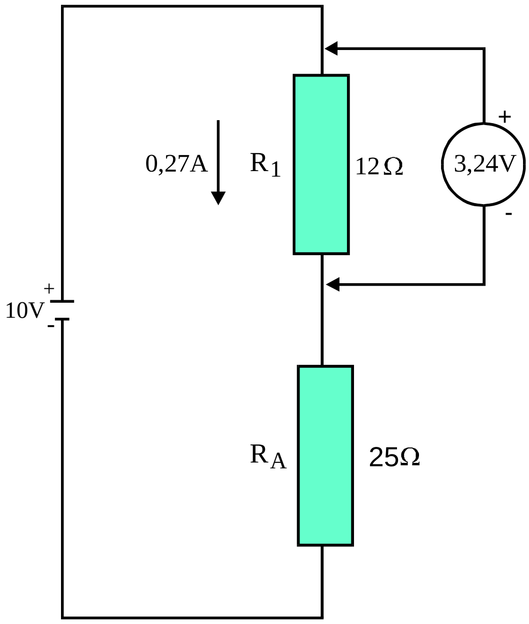
Pela 2.ª Lei de Kirchhoff

$$V = V_{R_1} + V_{R_A}$$

$$V_{R_A} = V - V_{R_1}$$

$$V_{R_A} = 10 - 3{,}243$$

$$V_{R_A} = 6{,}75\ \mathrm{V}$$



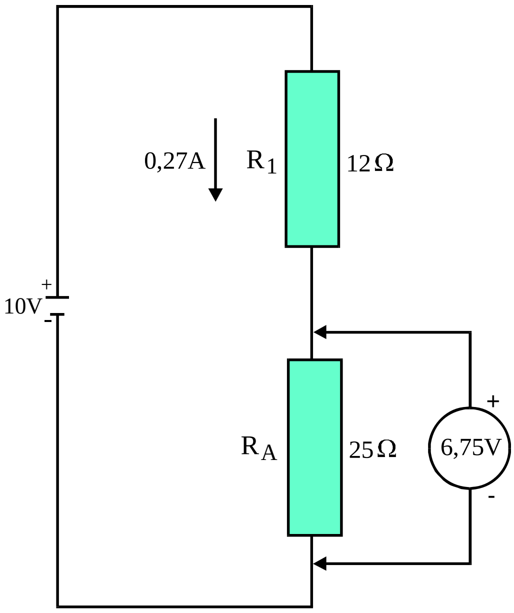
Pela Lei de Ohm

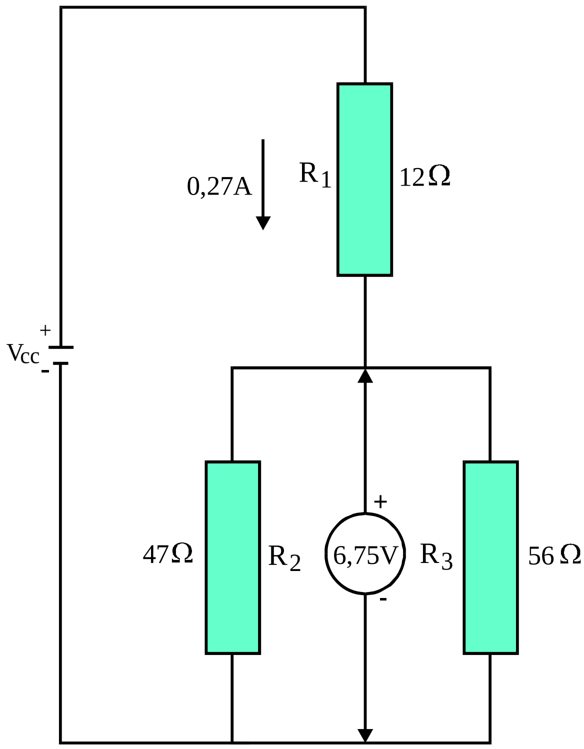
$$V_{R_A} = I_{R_A} \times R_A$$

$$V_{R_A} = 0{,}27 \times 25$$

$$V_{R_A} = 6{,}75\ \mathrm{V}$$

Calculando-se a queda de tensão em R_A, calcula-se na realidade, a queda de tensão na associação paralela de R_2 com R_3, mostrada nas figuras abaixo.



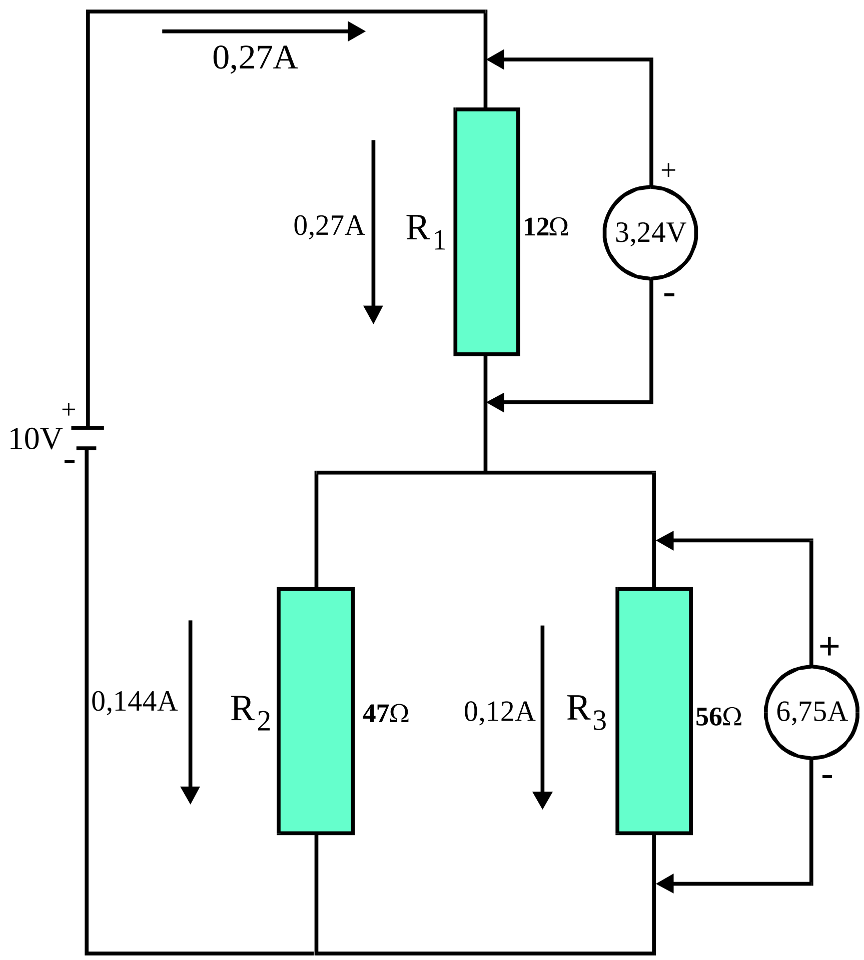


Os últimos valores a serem determinados são aqueles das correntes em R_2 (I_{R_2}) e R_3 (I_{R_3}).

$$I_{R_2} = \frac{V_{R_2}}{R_2} = \frac{6,75}{47} = 0,144\ \mathrm{A}$$

$$I_{R_3} = \frac{V_{R_3}}{R_3} = \frac{6,75}{56} = 0,12\ \mathrm{A}$$

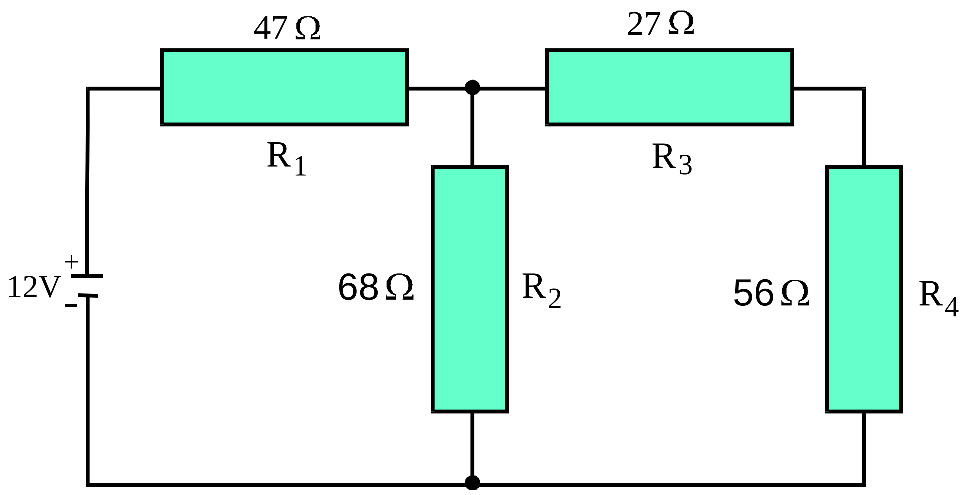
A figura abaixo mostra o circuito original com todos os valores de tensão e corrente.



Exemplo 6:

Para o circuito da figura abaixo, determinar :

a) A resistência equivalente.
b) A corrente total.
c) As tensões individuais.
d) As correntes individuais.

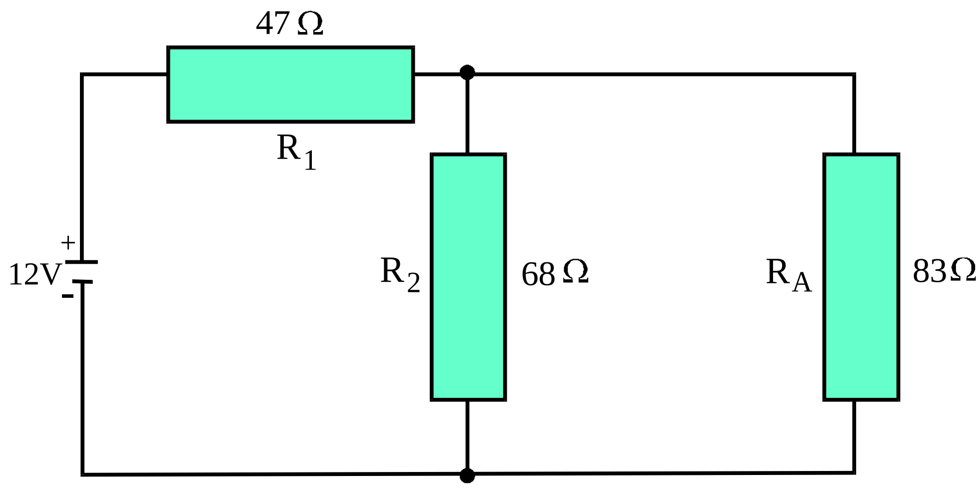


Solução :

a) Determinação da resistência equivalente :

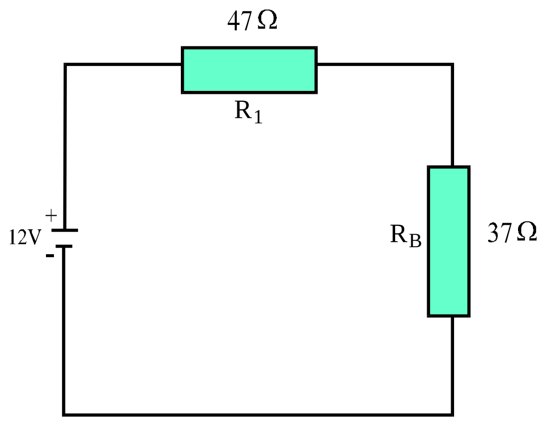
Substituem-se R_3 e R_4 em série no circuito por R_A , como mostrado na figura abaixo.

$$R_A = R_3 + R_4 = 83\ \Omega$$

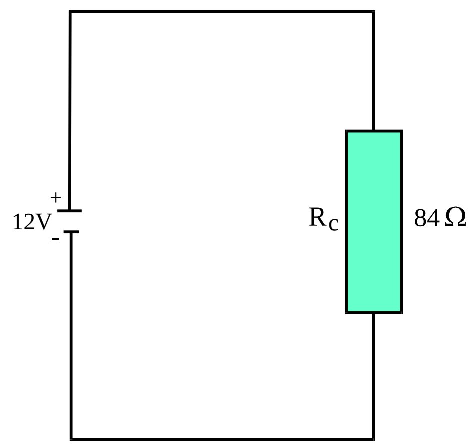


Substitui-se a associação paralela R_2// R_4 por um resistor R_B mostrado na figura abaixo.

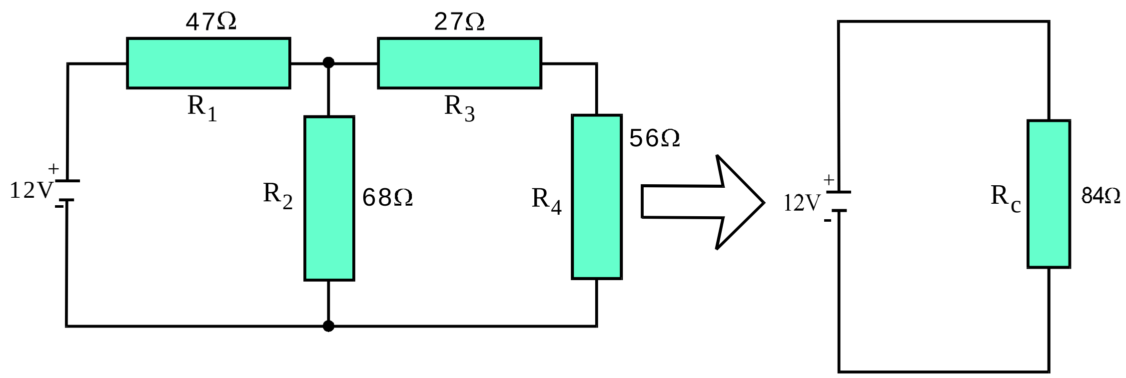
$$R_B = \frac{R_A \times R_2}{R_A + R_2} = 37\Omega$$



Em seguida, substitui-se a associação série de R_1 e R_B por um resistor R_C como mostrado na figura abaixo.



R_C pode ser denominado de R_{eq}, uma vez que representa a resistência total do circuito, ou seja :

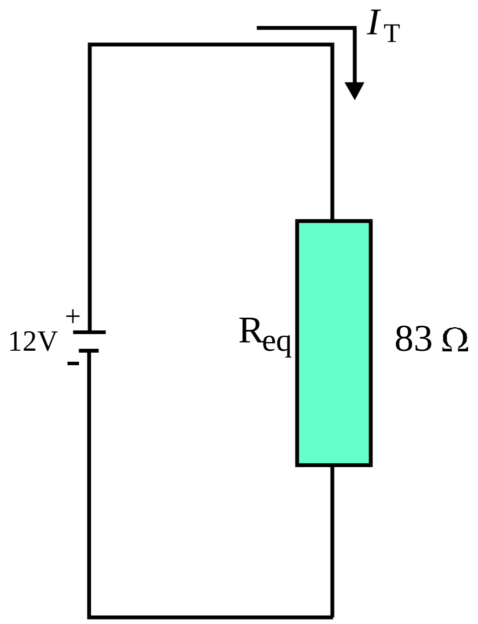


b) Determinação da corrente total :

Usam-se tensão de alimentação e a resistência equivalente, como mostrado na figura abaixo.

$$I_T = \frac{V_T}{R_{eq}}$$

$$I_T = \frac{12}{83} = 0{,}14239\text{A}$$



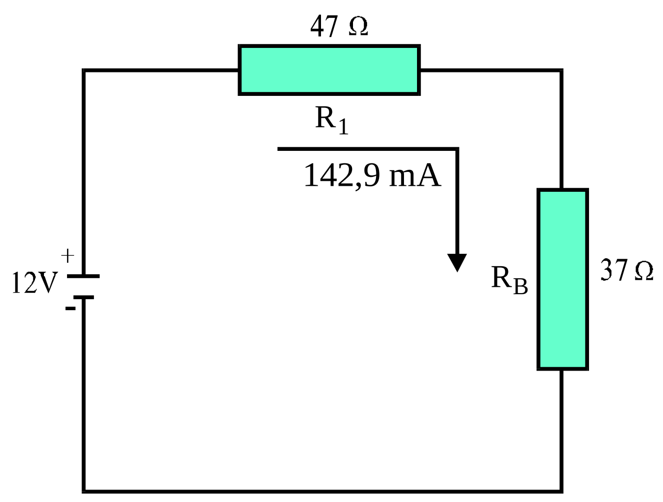
c) Determinação da queda de tensão em R_1 e R_B :

$$V_{R_1} = I_{R_1} \times R_1$$

$$I_{R_1} = I_T$$

$$V_{R_1} = 0{,}1429 \times 47$$

$$V_{R_1} = 6{,}72\text{ V}$$



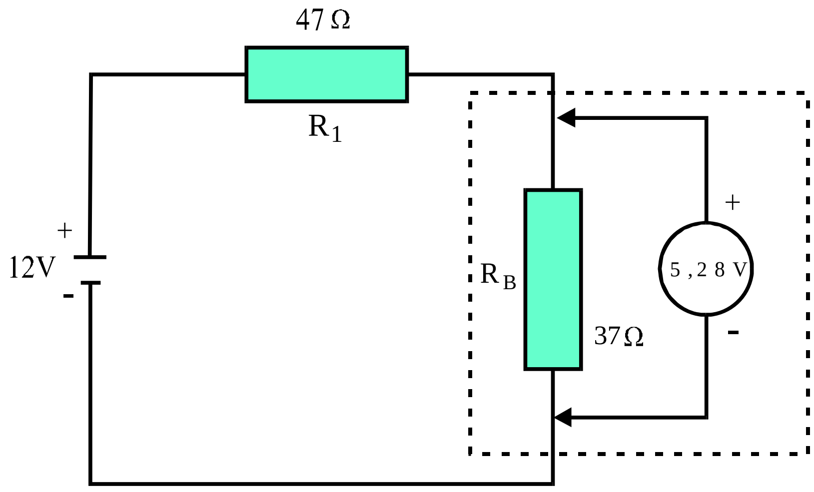
A queda no resistor R_B pode ser determinada pela 2.ª Lei de **Kirchhoff** :

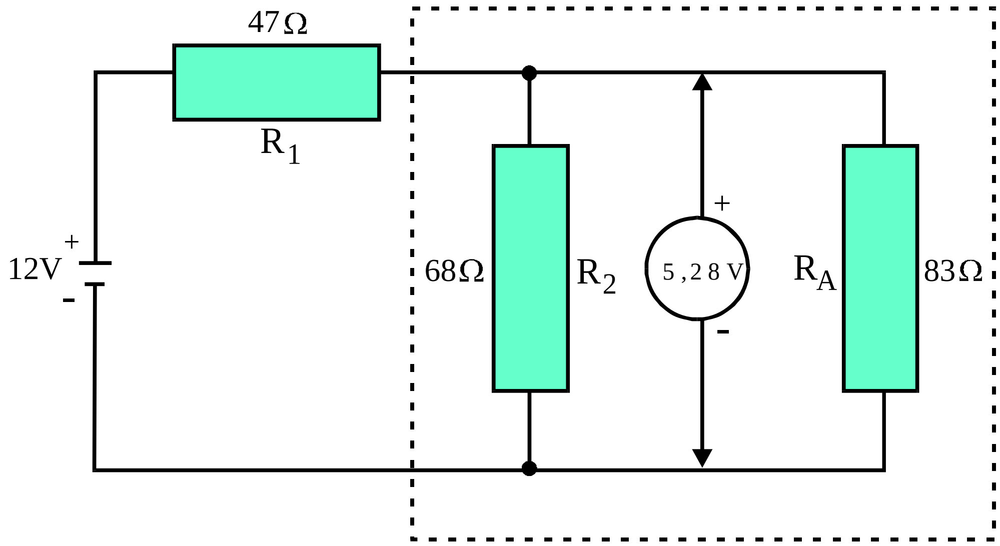
$$V = V_{R_1} + V_{R_B}$$

$$V_{R_B} = V - V_{R_1} = 5{,}28\text{ V}$$

d) Determinação das correntes em R_2 e R_A :

O resistor R_B representa os resistores R_2 e R_A em paralelo (primeiro circuito parcial). Portanto, a queda de tensão em R_B é, na realidade, a queda de tensão na associação $R_2//R_A$, como mostrado nas figuras abaixo.





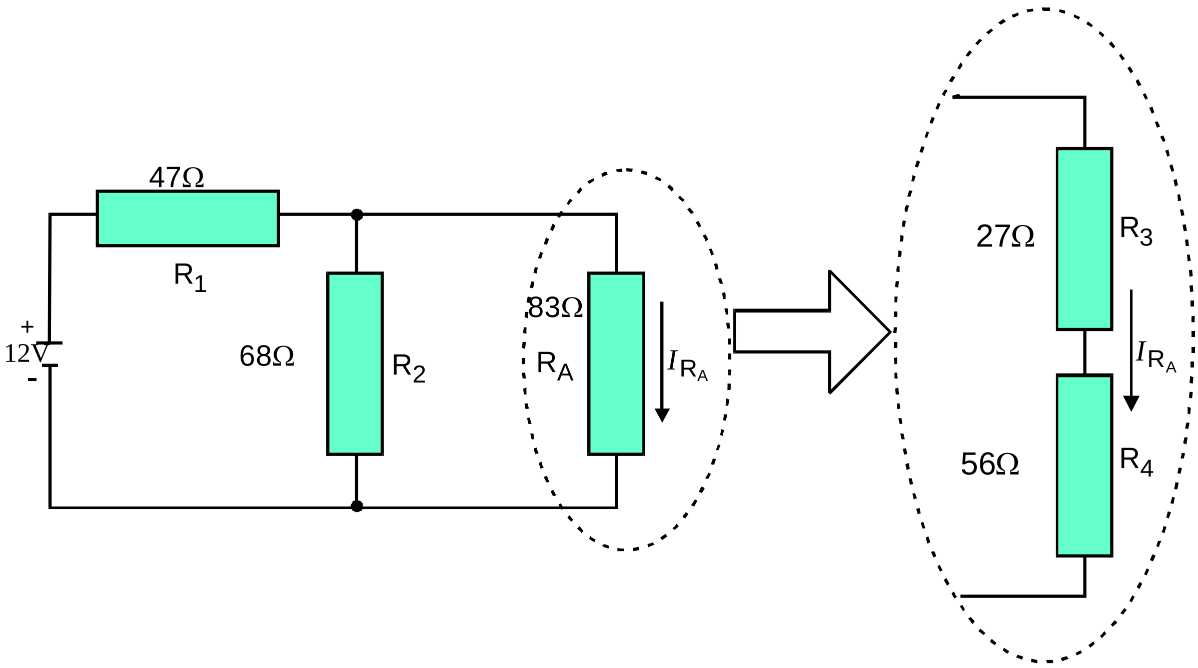
Usando-se a Lei de Ohm, podem-se calcular as correntes em R_2 e R_A.

$$I_{R_2} = \frac{V_{R_2}}{R_2} = 0{,}078\ \text{A}$$

$$I_{R_A} = \frac{V_{R_A}}{R_A} = 0{,}064\ \text{A}$$

e) Determinação das quedas de tensão em R_3 e R_4:

O resistor R_A representa os resistores R_3 e R_4 em série, como mostrado na figura abaixo.



Assim, a corrente determinada I_{R_A} é , na realidade, a corrente que circula nos resistores R_3 e R_4 em série.

Com o valor da corrente I_{R_A} e as resistências de R_3 e R_4, calculam-se as suas quedas de tensão pela Lei de Ohm.

$$V_{R_3} = I_{R_A} \times R_3 = 1{,}73\,\text{V}$$

$$V_{R_4} = I_{R_A} \times R_4 = 3{,}58\,\text{V}$$

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Enuncie a 1.ª Lei de Kirchhoff.

2. Enuncie a 2.ª Lei de Kirchhoff.

BIBLIOGRAFIA

KOLLER, ALLOIS. **As Leis de Kirchhoff** EP.05 {Die Kirchhoffschen Gesetze} Trad. e Adap. pelo Setor de Divulgação Tecnológica, Siemens. São Paulo - Siemens/Edgar Blücher, 1977, 59p.

VAN VALKENBURG, NOOGER & NEVILLE. **Eletricidade Básica**. 12.ª ed., São Paulo, Freitas Bastos, 1970, vol.2.

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Participar do processo de modernização industrial decorrente da Adoção de novas tecnologias, elegendo prioridades em nível nacional.

Introdução

Na análise de circuitos eletrônicos, é indispensável a medição da corrente que flui através dos componentes e da tensão em determinadas fontes deste circuito.

O conhecimento dos valores dessas duas grandezas elétricas possibilitam muitas vezes a identificação de defeitos em partes do circuito.

Para que se possa emitir um diagnóstico a respeito do funcionamento de um circuito eletrônico, devem-se antes de tudo se verificar se as correntes nos diversos ramos do circuito e as tensões sobre os componentes são adequadas.

Este fascículo foi elaborado para que o leitor conheça os procedimentos corretos de medição de tensão e corrente elétrica.

Para ter sucesso no desenvolvimento do conteúdo e atividades deste fascículo, o leitor já deverá ter conhecimentos relativos a:

- Associação de resistores.
- Lei de Ohm.
- Leis de Kirchhoff.

Medição em circuitos elétricos

A medição em circuitos elétricos consiste na utilização de instrumentos com o objetivo de verificar os valores das grandezas elétricas. A medição é uma forma de verificar se um circuito está funcionando corretamente, sendo muito utilizada na manutenção dos equipamentos.

PONTO DE REFERÊNCIA DE TENSÃO (TERRA)

Sempre que se deseja realizar uma medição, torna-se necessário estabelecer um ponto de referência em relação ao qual esta medição será realizada. Como exemplo, podem-se citar as medições de altura. Se alguém diz que uma torre tem 10m de altura, automaticamente se sabe que esta altura é a partir do solo. O solo é, então, o ponto de referência, conforme ilustrado na **Fig.1**.

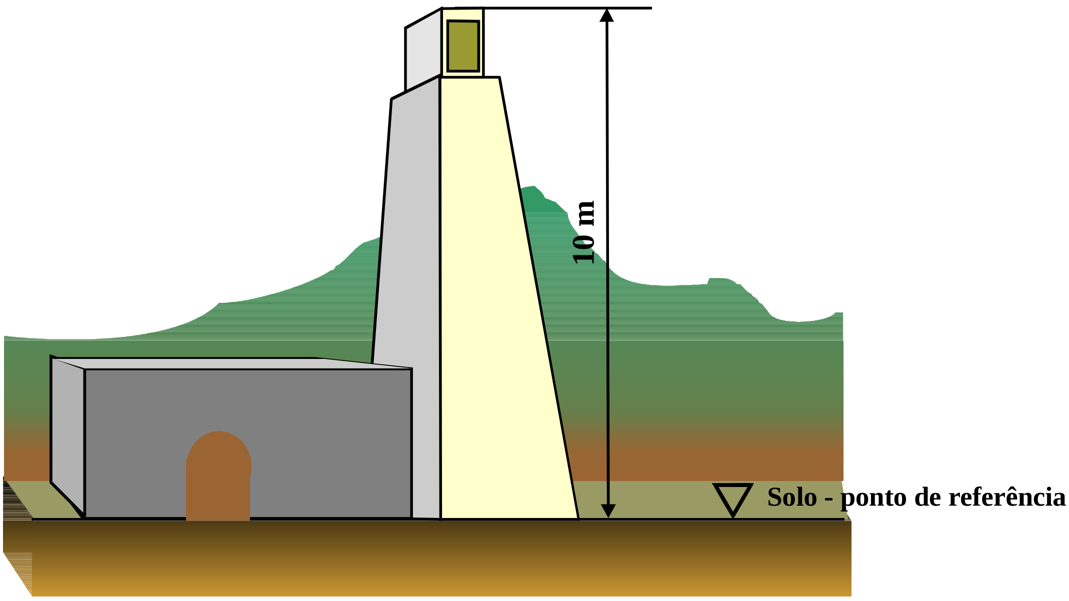


Fig.1 O solo como ponto de referência para medição de altura.

Nos circuitos eletrônicos é comum utilizar-se um ponto para medição de tensão. Este ponto é denominado de terra e se considera que a sua tensão é zero.

O terra é representado nos esquemas por um dos símbolos apresentados na **Fig**.**2**.

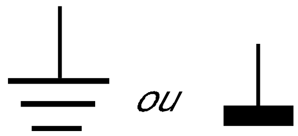


Fig.**2** Símbolos de representação do terra.

UTILIZAÇÃO DO TERRA NAS MONTAGENS

A utilização de um ponto de terra simplifica tanto a representação dos circuitos em esquemas como a sua montagem.

Em geral, o terra de um circuito é conectado a um dos pólos da fonte de alimentação. Quando isso acontece, todos os pontos do circuito que são ligados a esse pólo recebem o símbolo do terra.

A **Fig**.**3** mostra o esquema de um circuito elétrico no qual não se utiliza o terra e a **Fig**.**4** mostra o esquema do mesmo circuito elétrico utilizando o terra conectado ao pólo negativo da fonte de alimentação.

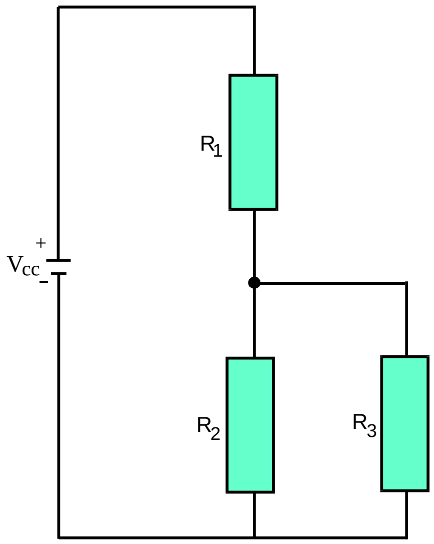


Fig.**3** Circuito sem utilização do terra.

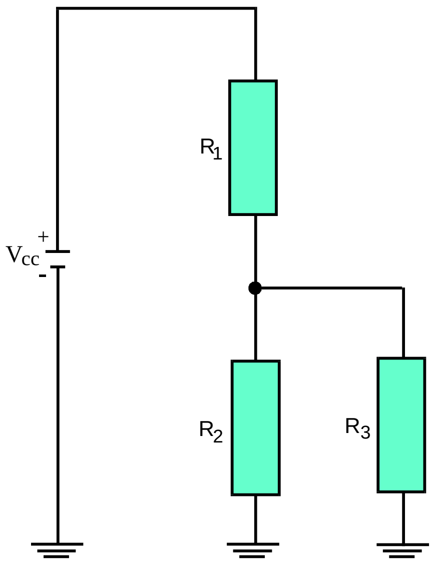


Fig.**4** Circuito com a utilização do terra.

Nos esquemas de pequenos circuitos a utilização do símbolo de terra não promove uma grande simplificação. Entretanto, em circuitos onde um grande número de componentes é ligado ao mesmo pólo da bateria, o esquema torna-se muito mais claro.

Ao realizar-se a montagem do circuito, todos os pontos que tiverem um símbolo de terra serão interligados através de um condutor, como pode ser visto na **Fig.5**.

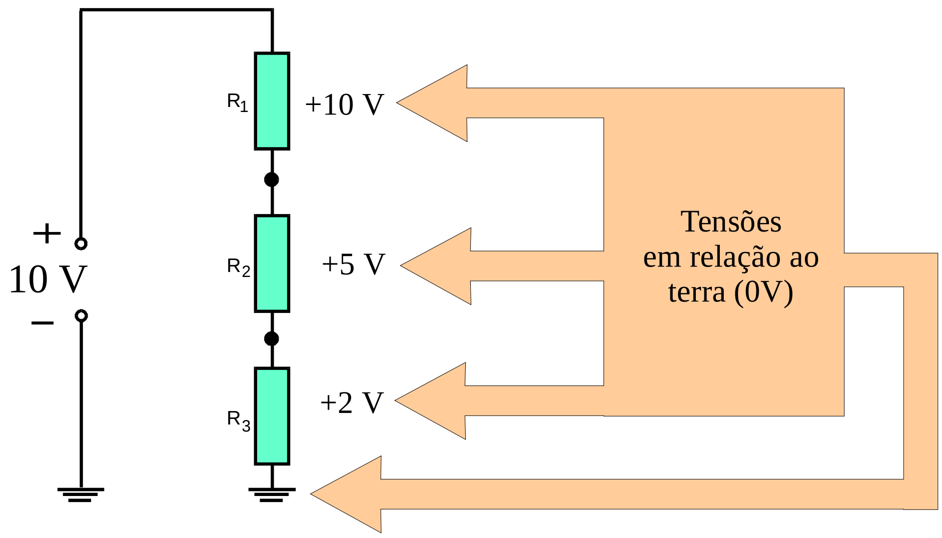


Fig.5 Ligação através do condutor de terra.

MEDIÇÃO DE TENSÃO EM UM CIRCUITO

Um voltímetro pode ser utilizado para dois tipos de medição em um circuito:

- Para medição da tensão em relação ao terra.
- Para medição da queda de tensão sobre um componente.

CONEXÃO PARA MEDIÇÃO DA TENSÃO EM RELAÇÃO AO TERRA

As medições de tensão com relação ao terra são mais utilizadas. Os valores de tensão fornecidos nos esquemas são sempre com relação ao terra, como indicado na **Fig.6**.

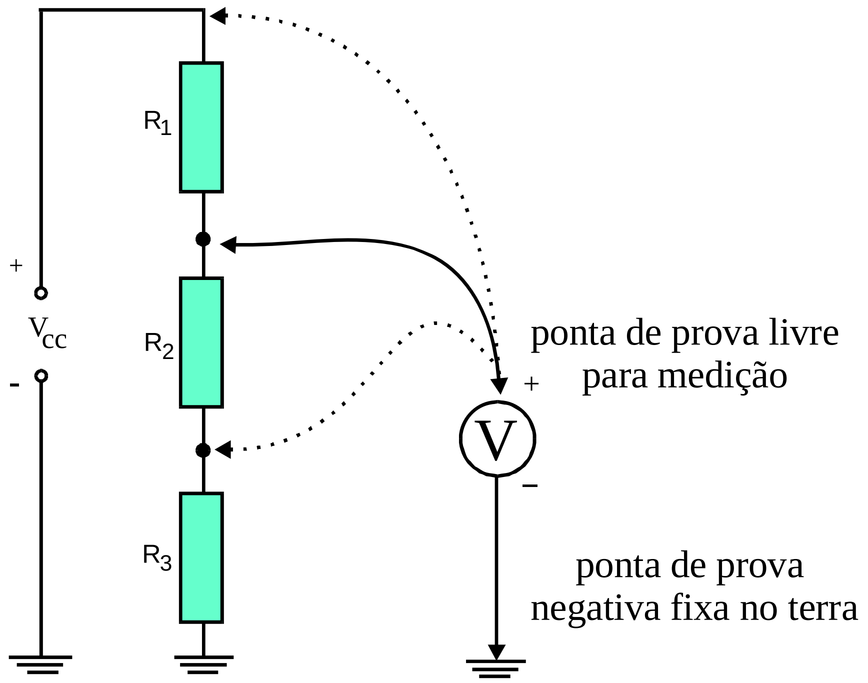


Fig.6 Tensões referenciadas ao terra.

Quando um valor não é medido em relação ao terra, deve aparecer uma observação indicando qual o ponto de referência utilizado para a medição. Para utilização do voltímetro em medição de tensão com relação ao terra, uma das pontas do voltímetro permanece conectada ao terra do circuito.

TERRA NEGATIVO E TERRA POSITIVO

Quando o pólo negativo da fonte alimentadora é conectado ao terra, o terminal negativo do voltímetro CC deve ser ligado ao terra. A ponta de prova positiva é a ponta de medição e será conectada ao ponto do circuito cuja tensão se deseja medir.

Quando o terra é negativo, as tensões lidas no voltímetro são positivas, (por exemplo 6V, 1,5V etc).

Quando o pólo positivo da fonte é conectado ao terra, é o terminal positivo do voltímetro que deve ser conectado ao terra. A ponta de prova negativa será a ponta livre para os testes.

Deve-se sempre verificar cuidadosamente qual dos pólos da fonte de alimentação está ligado ao terra para conectar a ponta de prova correta do voltímetro.

Quando o terra é positivo, as tensões lidas no voltímetro são negativas, (por exemplo -10V, -6V, -2V etc).

A **Fig.7** ilustra esses procedimentos.

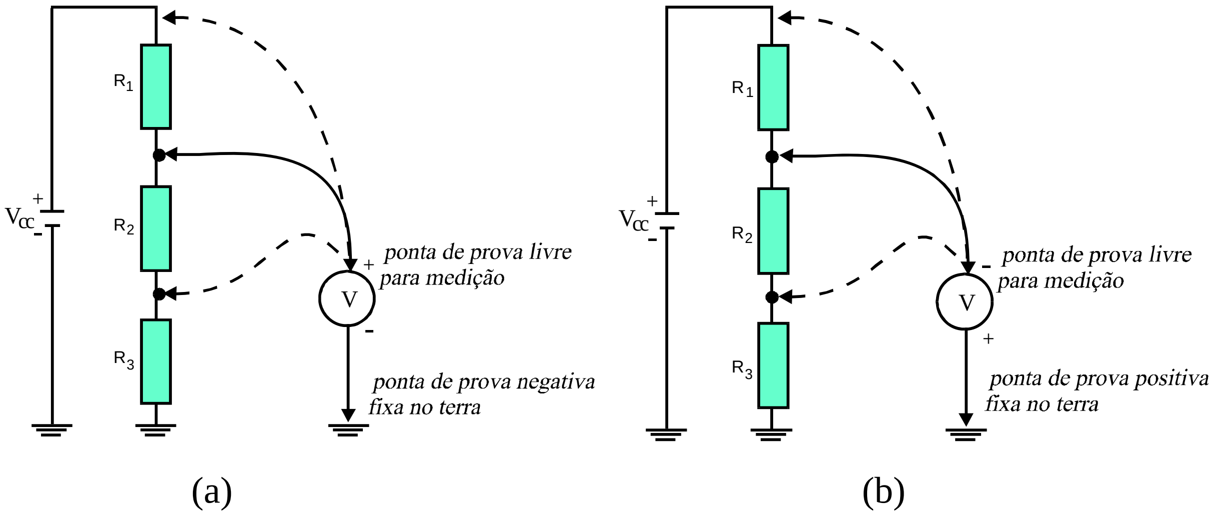


Fig.7 Procedimento de medição com terra negativo (a) e terra positivo (b).

POTENCIAL DE UM PONTO

Ao utilizar o terra como referência para uma medição, o valor de tensão encontrado é denominado de **potencial do ponto**.

A **Fig.8** mostra um voltímetro que indica o potencial do ponto A.

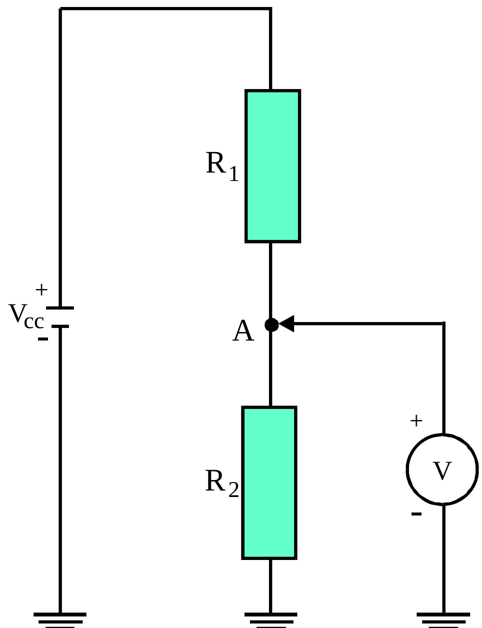


Fig.8 O voltímetro indica o potencial do ponto A.

Costuma-se dizer nesses casos que o voltímetro indica V_A (o potencial do ponto A).

A **Fig.9** mostra a medição do potencial nos pontos A, B e C (V_A, V_B, V_C) em um circuito.

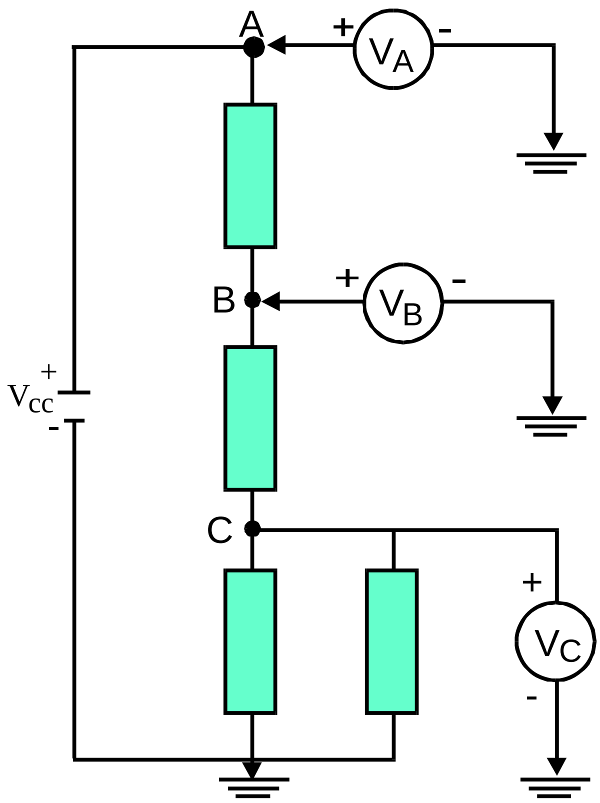


Fig.9 Medição dos potenciais V_A, V_B e V_C .

CONEXÕES PARA MEDIÇÃO DA TENSÃO SOBRE UM COMPONENTE

Essas conexões são realizadas apenas quando é necessário conhecer a queda de tensão sobre um componente.

As pontas de prova do voltímetro CC. são aplicadas diretamente aos terminais do componente em questão, como pode ser visto na **Fig.10**.

Deve-se, nesse caso, observar-se cuidadosamente a polaridade da tensão sobre o componente para não provocar a deflexão do ponteiro no sentido contrário.

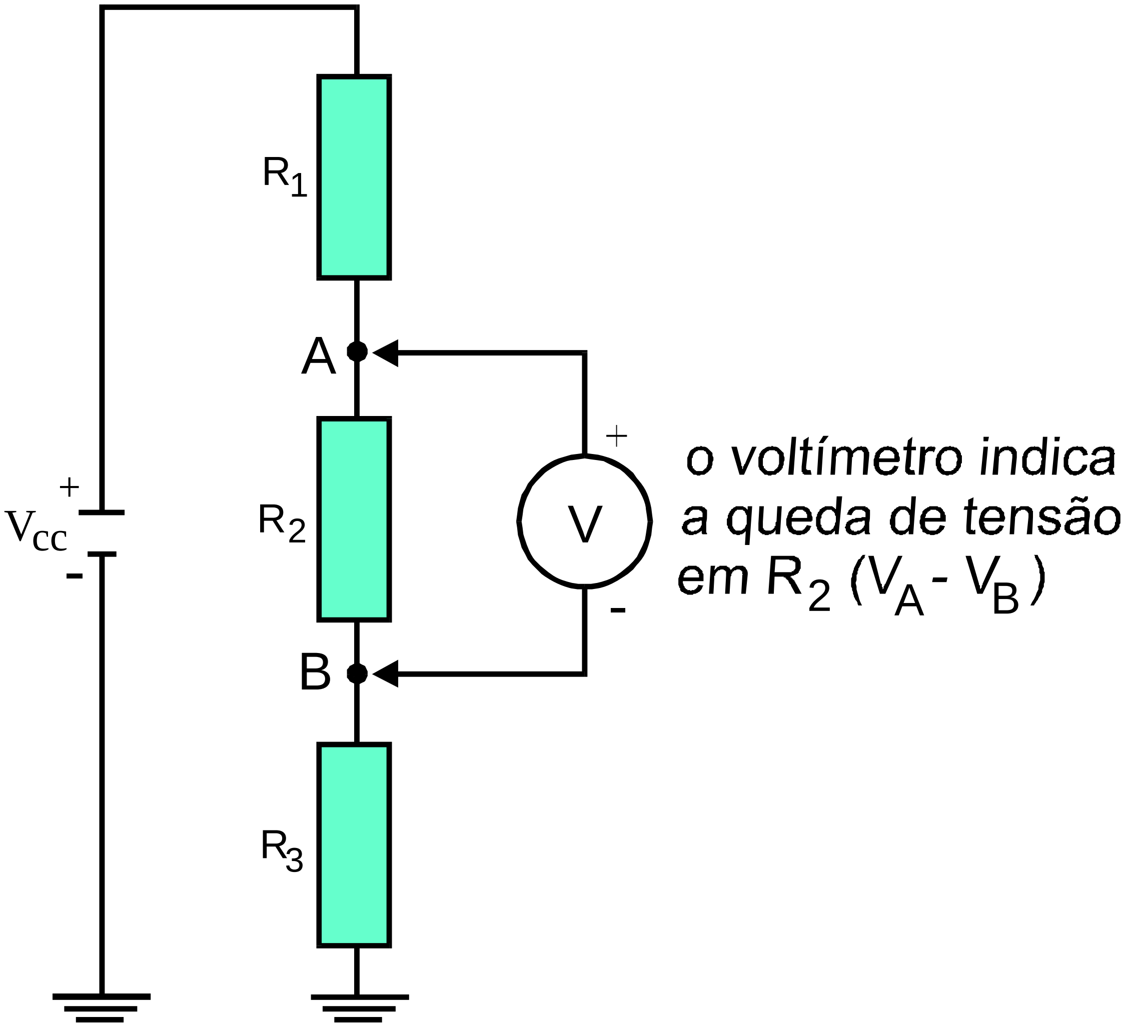


Fig.10 Queda de tensão em R_2 .

Nessa situação, na verdade, o voltímetro está medindo uma diferença de potencial entre dois pontos: o potencial no terminal superior do resistor (ponta A) menos o potencial no terminal inferior (ponta B).

Na prática, não se utiliza a expressão $V_A - V_B$, identificando a medição de tensão entre os pontos A e B como V_{AB} .

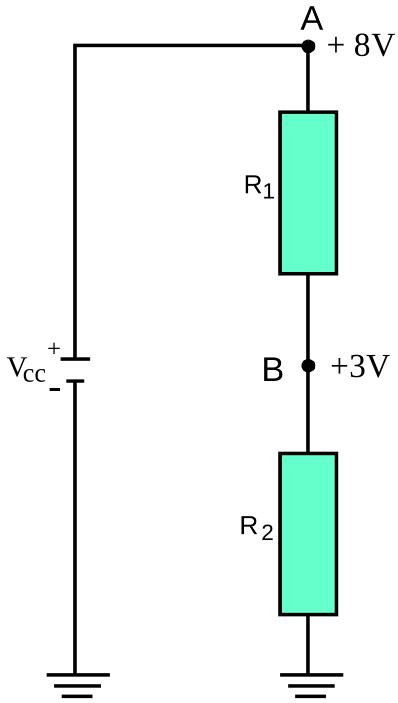
Deve-se ter um cuidado especial com esse tipo de medição porque o resultado depende da ordem das letras: V_{AB} é diferente de V_{BA}.

$$V_{AB} = V_A - V_B$$

$$V_{BA} = V_B - V_A$$

Exemplo 1:

No circuito da figura abaixo, determine V_{AB} e V_{BA} .



Solução :

$V_{AB} = V_A - V_B = 8 - 3$

$V_{AB} = +5V$

$V_{BA} = V_B - V_A = 3 - 8$

$V_{BA} = -5V$

Verifica-se que a ordem V_{AB} ou V_{BA} implica em troca de sinal nas medidas.

MEDIÇÃO DE CORRENTE EM CIRCUITO

A medição de corrente em circuitos simples compostos por apenas uma fonte geradora e um consumidor é feita colocando-se o medidor em série com o circuito, como ilustrado na **Fig.11**.

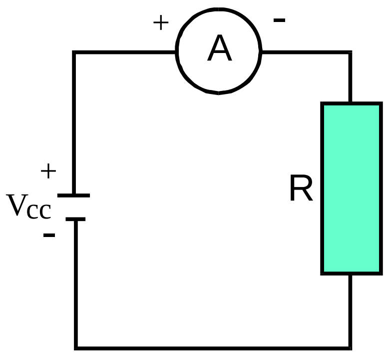


Fig.11 Medidor em série para a medição da corrente.

Em circuitos mais complexos, tais como as associações de resistores, dependendo da posição em que for colocado no circuito, o medidor pode indicar uma corrente parcial ou total, como mostrado na **Fig**.**12**.

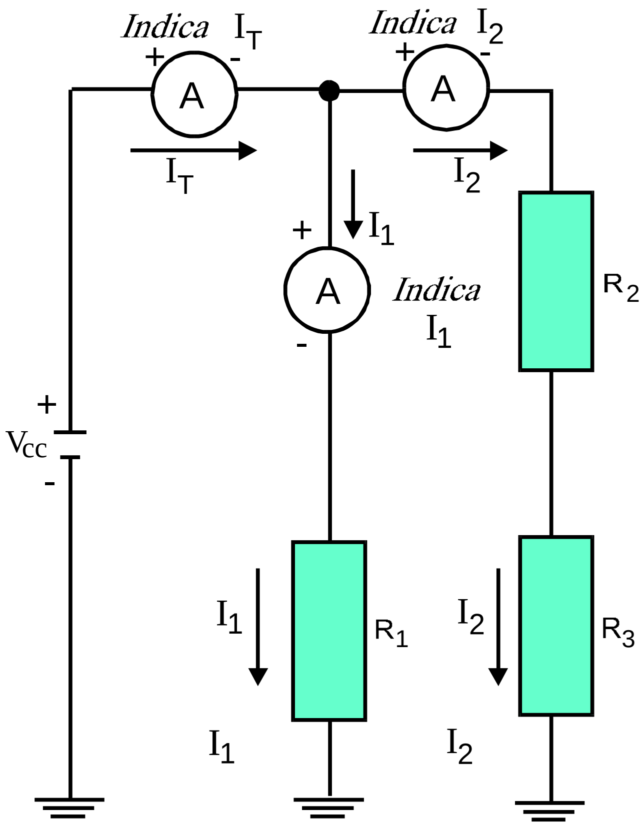


Fig.**12** O medidor indicando corrente total ou parcial.

Deve-se verificar cuidadosamente a polaridade e a posição do amperímetro para preveni-lo contra danos e garantir que a corrente indicada seja aquela que se deseja medir. Os medidores de corrente sempre são ligados de forma que a corrente entre no instrumento pelo terminal positivo (sentido convencional da corrente dos circuitos).

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Qual o ponto comum para a medição de tensão ?

2. Exemplifique o uso do terra numa montagem.

3. Para que tipos de medição o voltímetro pode ser usado ?

BIBLIOGRAFIA

KOLLER, ALLOIS. **As Leis de Kirchhoff** EP.05 {Die Kirchhoffschen Gesetze} Trad. e Adap. pelo Setor de Divulgação Tecnológica, Siemens. São Paulo - Siemens/Edgar Blücher, 1977, 59p.

VAN VALKENBURG, NOOGER & NEVILLE. **Eletricidade Básica**. 12.ª ed., São Paulo, Freitas Bastos, 1970, vol.2.

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Nosso negócio

Educação para o Trabalho e Cidadania.

Introdução

Com a evolução da tecnologia e dos meios produtivos, os equipamentos eletrônicos têm se tornado cada vez mais compactos. Isto torna necessário que estes equipamentos sejam alimentados por fontes de energia portáteis (pilhas e baterias).

Surge então a questão: como fornecer diferentes tensões adequadas a cada componente a partir de uma tensão única, fornecida pela fonte? A resposta está nos **divisores de tensão**.

Este fascículo foi elaborado para o seu conhecimento e compreensão da forma de funcionamento e particularidades dos divisores de tensão, visando a capacitá-lo a dimensionar corretamente os resistores que os compõem.

Para ter sucesso no desenvolvimento do conteúdo e atividades deste fascículo, o leitor já deverá ter conhecimentos relativos a :

- Leis de Kirchhoff.

Divisor de tensão

É um circuito formado por resistores que permite obter, a partir de alimentação fornecida, qualquer valor de tensão menor, necessário ao funcionamento dos circuitos. A **Fig.1** mostra um exemplo de um divisor de tensão.

Divisor de tensão

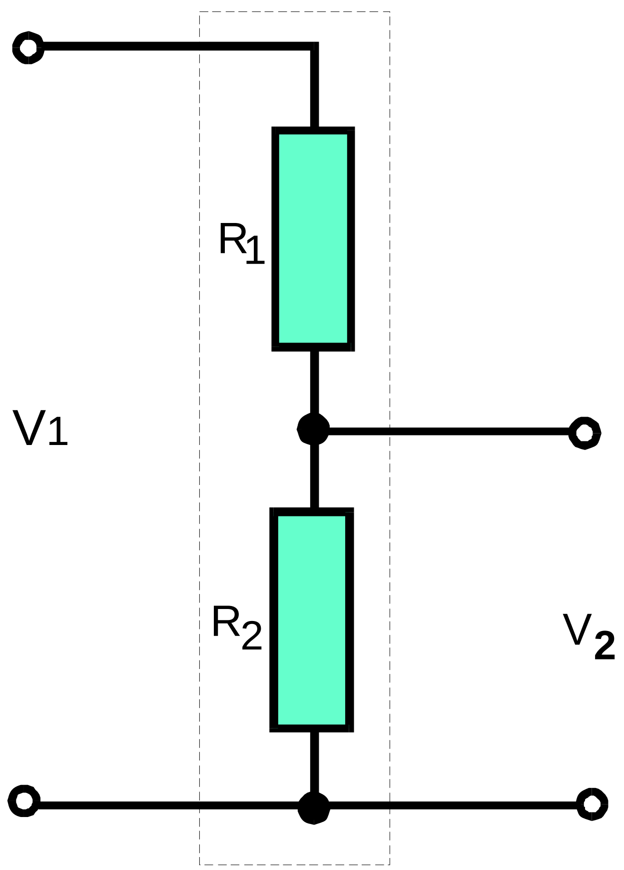


Fig.1 Divisor de tensão.

O divisor de tensão é muito utilizado nos circuitos eletrônicos para a obtenção da tensão típica de funcionamento de cada componente sem que seja necessário usar diversas fontes de alimentação.

O CIRCUITO SÉRIE COMO DIVISOR DE TENSÃO

Um circuito série, formado por dois resistores, divide a tensão aplicada na sua entrada em duas partes, ou seja, duas quedas de tensão, conforme ilustrado na **Fig.2**.

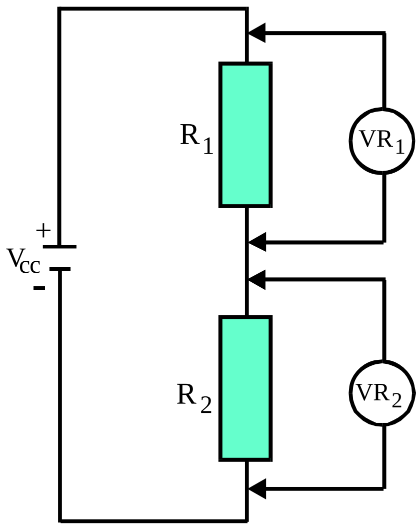


Fig.2 Queda de tensão em dois resistores ligados em série.

O circuito série é, portanto, um divisor de tensão. Dimensionando os valores dos resistores pode-se dividir a tensão de entrada de qualquer forma que seja necessária, como mostrado no exemplo da **Fig.3**.

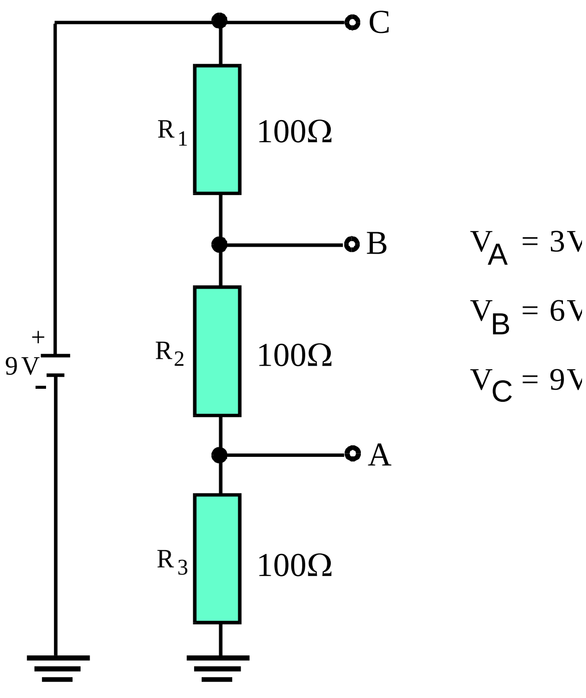


Fig.3 Divisão da tensão de acordo com os valores das resistências.

DIVISOR DE TENSÃO COM CARGA

A divisão da tensão através de um divisor resistivo tem por finalidade fornecer uma parte da tensão de alimentação para um componente ou circuito.

Por exemplo, pode-se utilizar um divisor de tensão para obter 6V numa lâmpada, a partir de uma fonte de 10V, conforme ilustrado na **Fig.4**.

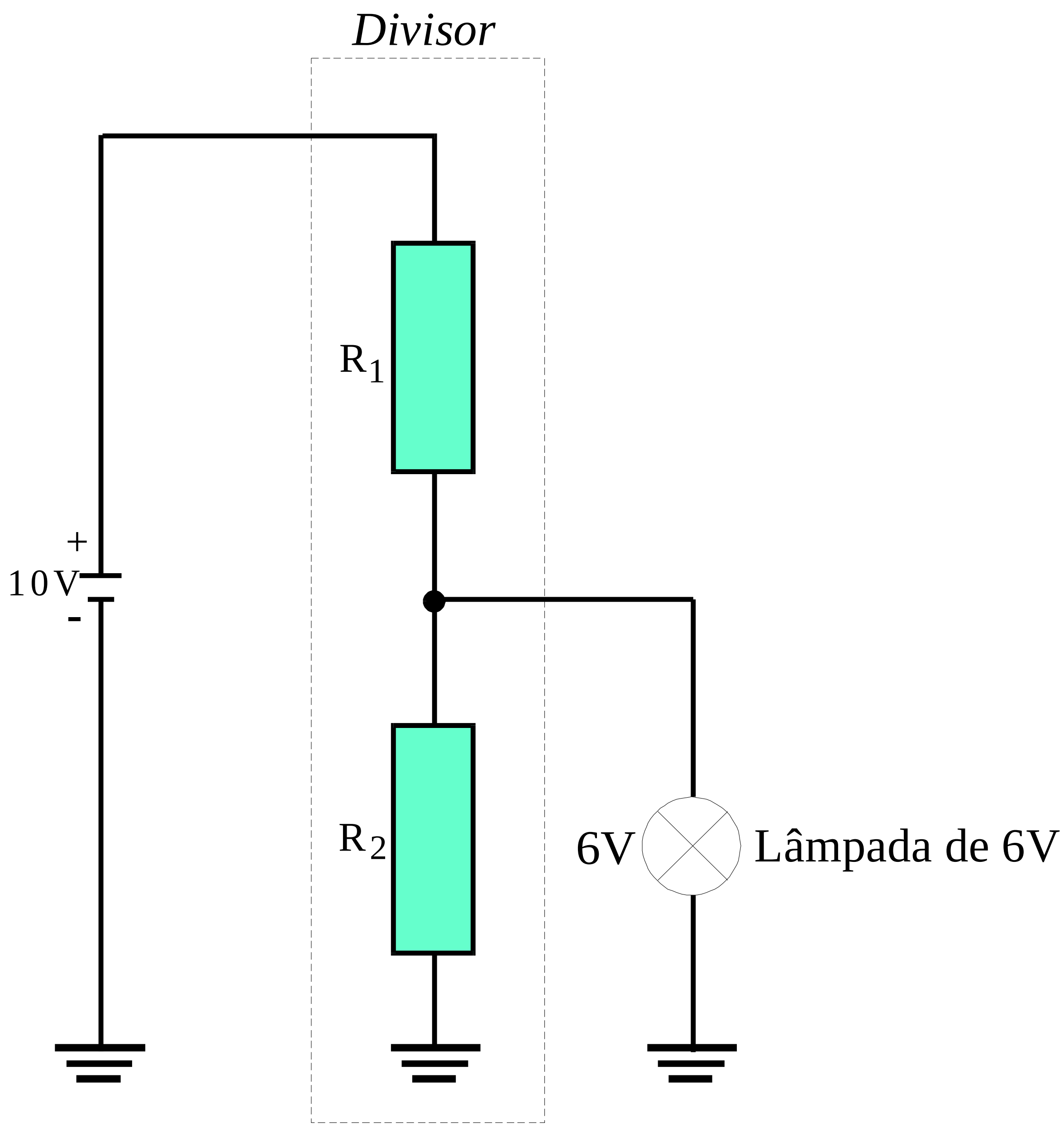


Fig.4 Obtenção de uma tensão de 6V a partir de uma fonte de 10V.

A tensão fornecida pela fonte ao divisor é denominada de tensão de entrada, e a tensão fornecida pelo divisor à carga é denominada de tensão de saída. O circuito ou componente que é aumentado pelo divisor é denominado de carga do divisor, como pode ser visto na **Fig. 5**

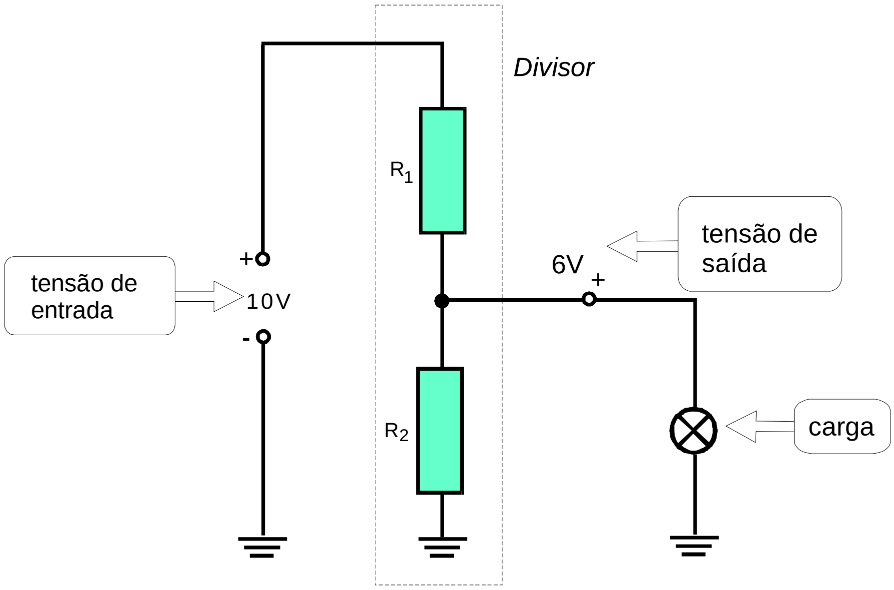


Fig. 5 O componente conectado à saída é denominado de "carga".

A carga de um divisor pode ser um componente eletrônico, uma lâmpada ou até mesmo um circuito eletrônico. Por esta razão, quando se calcula ou representa em diagrama um divisor, a carga é representada simplesmente por um bloco, denominado R_L, independentemente do que seja realmente, como pode ser visto na **Fig.6**.

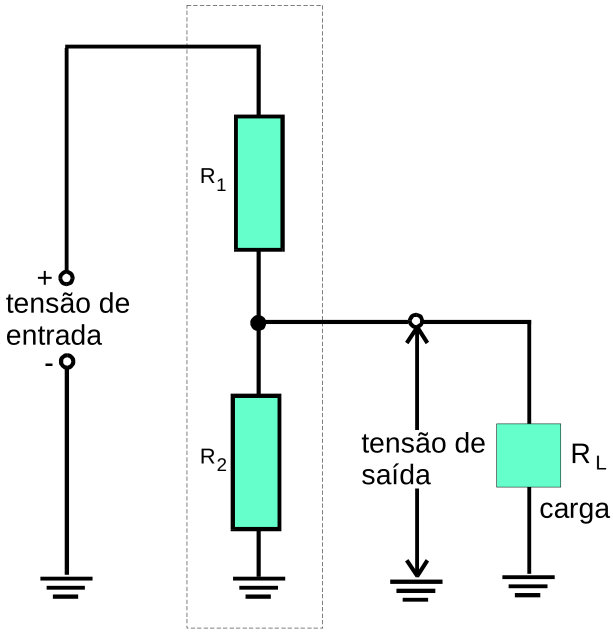


Fig.6 Representação da carga R_L.

INFLUÊNCIA DA CARGA SOBRE O DIVISOR

Qualquer carga que seja conectada a um divisor de tensão, fica sempre em paralelo com um dos resistores que o compõem. Como pode ser visto no exemplo da **Fig.7**, ao ligar a chave a carga fica em paralelo com R_2.

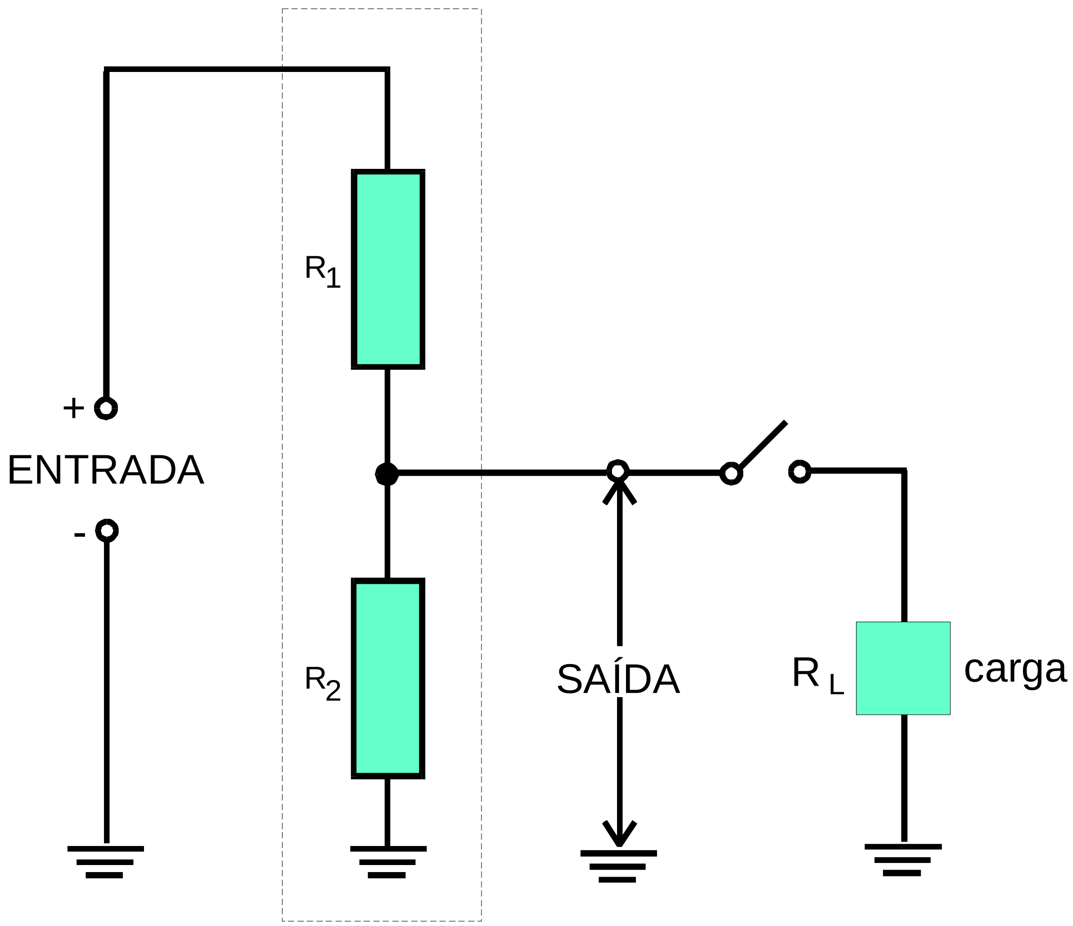


Fig.7 A carga é conectada em paralelo com R_2.

Ao ser conectada ao divisor, a carga altera a resistência total do circuito divisor, fazendo com que as tensões em cada resistor se modifiquem. Por esta razão sempre que se calcula um divisor deve-se determinar as características da carga e considerá-la como sempre ligada ao circuito.

Dimensionamento do divisor de tensão

Os dados necessários para o dimensionamento dos componentes de um divisor são:

- Tensão de entrada.
- Tensão de carga (ou de saída do divisor).
- Corrente de carga.

Exemplo 1:

Necessita-se alimentar uma lâmpada de 6V e 0,5W a partir de uma fonte que fornece $10V_{cc}$. Dimensionar o divisor de tensão.

Do enunciado, obtêm-se diretamente dois dados:

- Tensão de entrada : $10V_{cc}$.
- Tensão de carga : $6V_{cc}$.

A corrente de carga não é fornecida diretamente, mas pode ser determinada através da seguinte equação:

$$P = V \times I \qquad (1)$$

$$P_{Carga} = 0{,}5\ W$$

$$I_{Carga} = \frac{P_{Carga}}{V_{Carga}} = \frac{0{,}5}{6} = 0{,}083\ A$$

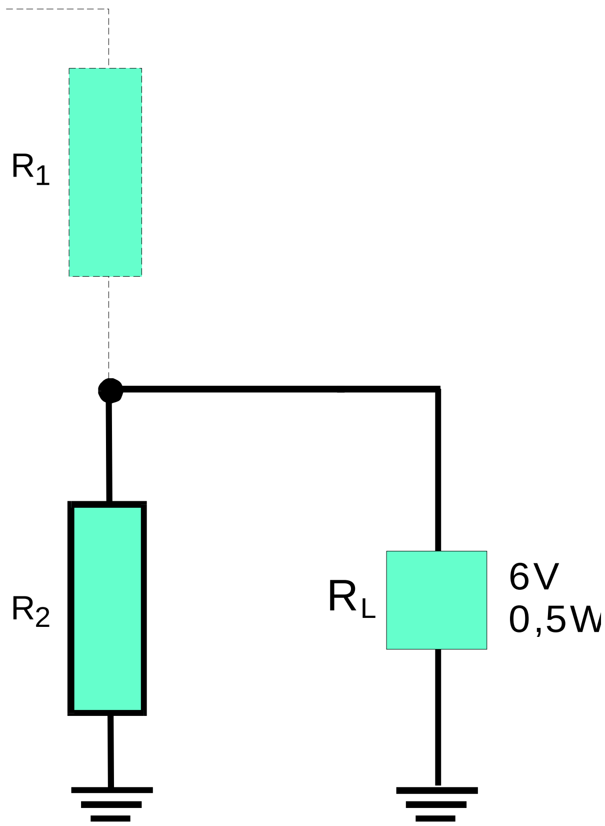
Uma vez dispondo dos dados essenciais, pode-se elaborar um esquema do divisor de tensão que contenha estes dados.

Dimensionamento do valor de R_2

Para se determinar o valor de R_2, utiliza-se a lei de Ohm:

$$R = V/I$$

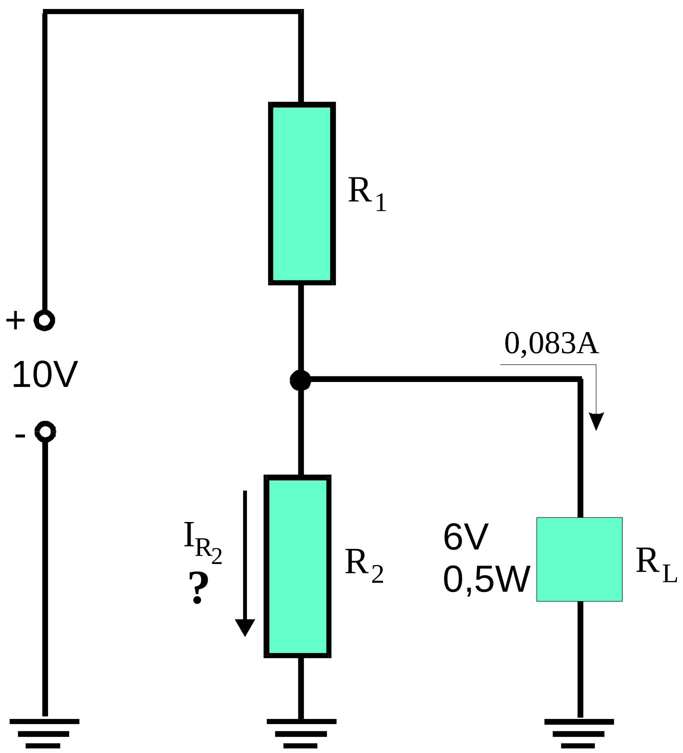
A tensão sobre R_2 é a mesma tensão da carga, uma vez que R_2 e a carga estão em paralelo, conforme ilustrado na figura abaixo.



Para se determinar o valor de R_2 pela Lei de Ohm, necessita-se ainda da corrente neste resistor, que não é fornecida no enunciado do problema.

Para dar continuidade ao cálculo é necessário admitir (escolher) um valor para esta corrente. Quando a carga não varia, solicitando do divisor uma corrente de valor fixo, como é o caso de lâmpadas e resistores, qualquer valor pode ser admitido para a corrente em R_2. Por exemplo I_{R_2} = 10mA, 200mA, 1mA ou 1A. Em geral, admitem-se valores de corrente pequenos para que a dissipação de potência nos resistores do divisor seja pequena.

Retornando ao exemplo, admitindo-se uma corrente de 10mA no resistor R_2 , como ilustrado abaixo, tem-se:



$$R_2 = \frac{V_{R_2}}{I_{R_2}} = \frac{6}{0,01} = 600\,\Omega$$

Dimensionamento do valor de R_1

O resistor R_2 também é determinado pela Lei de Ohm:

$$R_2 = \frac{V_{R_2}}{I_{R_2}}$$

Fazendo-se necessário determinarem-se os valores de V_{R_2} e I_{R_2}.

A queda de tensão em R_2 pode ser determinada através da 2ª Lei de Kirchhoff

$$V_{cc} = V_{R_1} + V_{R_2} + \ldots\ldots\ldots V_R \qquad (2)$$

A queda de tensão sobre R_1 é a tensão de entrada menos a tensão de saída

$$V_{R_1} = V_{cc} - V_{Saída}$$

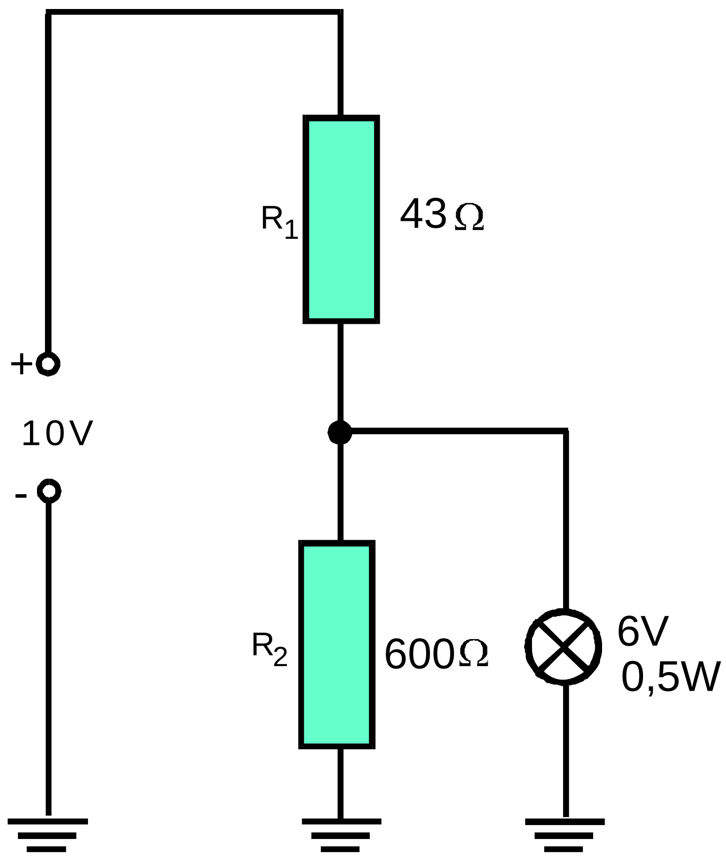
A corrente em R_1 pela 1ª Lei de Kirchhoff é a soma das correntes em R_2 e R_L:

$$I_{R_1} = I_{R_2} + I_{R_L}$$

Substituindo-se V_{R_1} e V_{R_2} na Lei de Ohm, tem-se:

$$R_1 = \frac{V_{cc} - V_{R_2}}{I_{R_2} + I_{R_L}} = \frac{10 - 6}{0,01 + 0,083} = 43\Omega$$

A figura seguinte mostra o esquema do divisor de tensão com os valores de R_1 e R_2 calculados.



PADRONIZAÇÃO DOS VALORES DOS RESISTORES

Normalmente os valores de resistor encontrados através do cálculo não coincidem com os valores padronizados de resistores encontrados no comércio.

Após realizar o cálculo, deve-se escolher os resistores comerciais mais próximos dos calculados. Por exemplo, no divisor usado como exemplo, tem-se:

R_1=43Ω (não comercial)

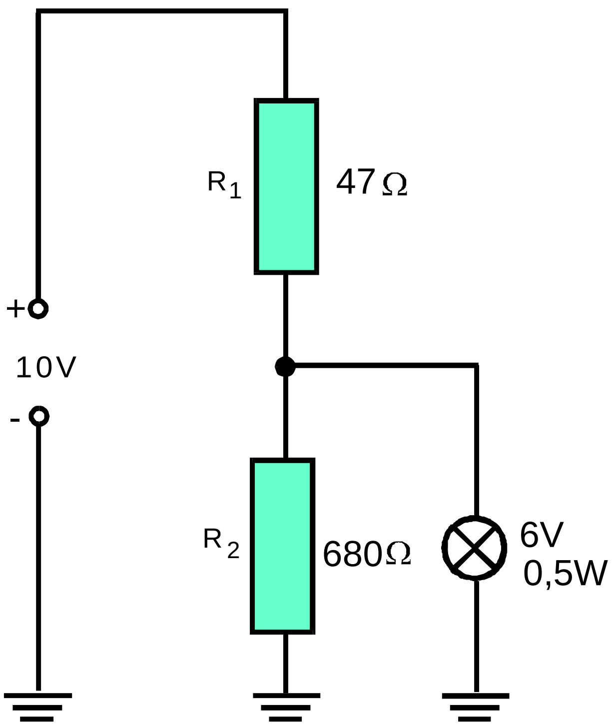
Primeira opção comercial: 47Ω.
Segunda opção comercial: 39Ω.

R_2=600Ω (não comercial)

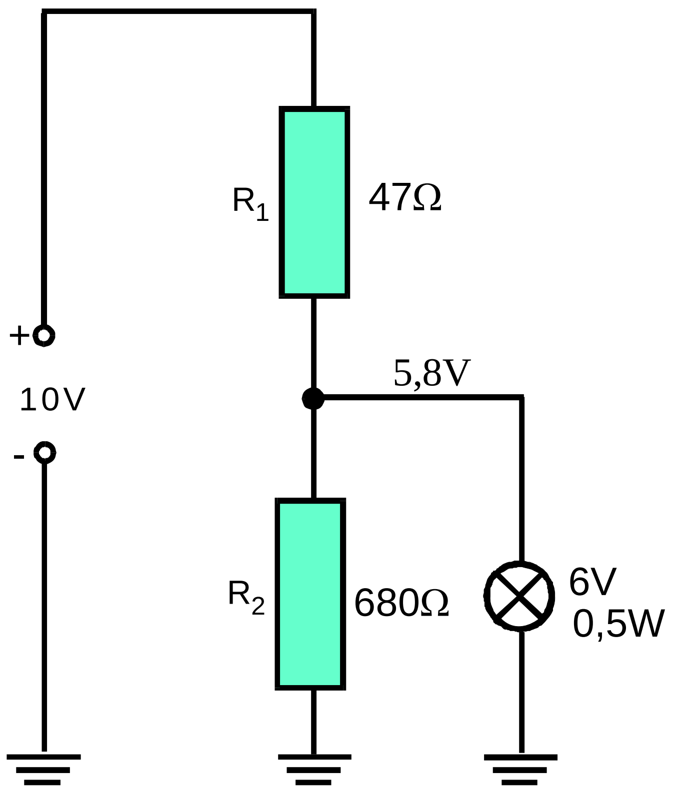
Primeira opção comercial: 680Ω.
Segunda opção comercial: 560Ω.

Optando-se pelo valor comercial mais alto que 43Ω, ou seja, 47Ω no caso, deve-se optar também pelo valor mais alto que 600Ω, ou seja, 680Ω e vice-versa.

O divisor fica com a configuração mostrada na figura seguinte :



A substituição dos resistores calculados por valores padronizados provoca diferença nas tensões do divisor. Sempre se deve recalcular as tensões do divisor com os valores padronizados, como ilustrado abaixo.



Observa-se pela figura acima que a padronização dos resistores provoca uma pequena diferença na tenção de saída do divisor (de 6V para 5,8V).

DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA DE DISSIPAÇÃO DOS RESISTORES

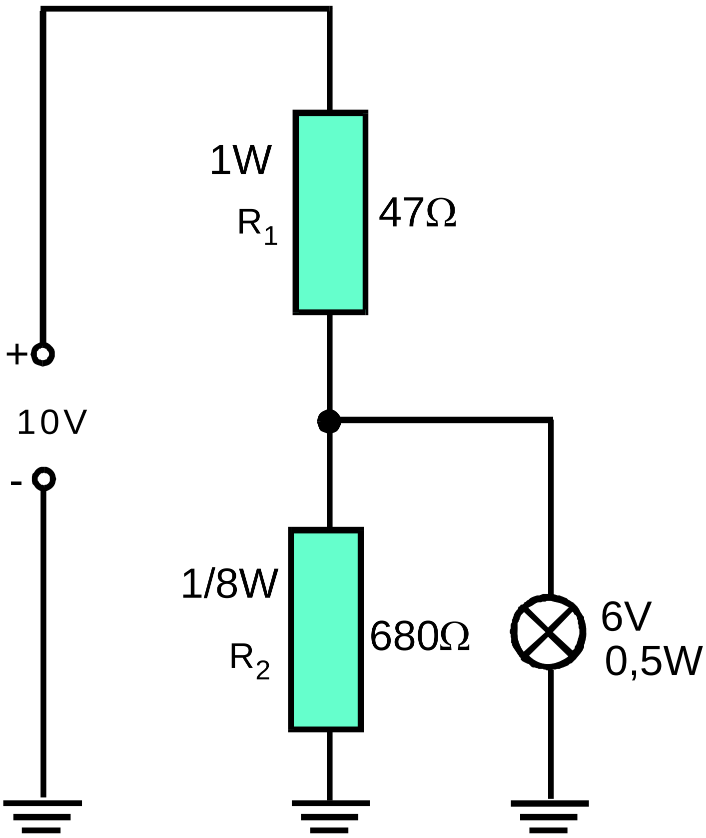
Uma vez definidos os resistores padronizados e as tensões do divisor, determinam-se as potências de dissipação dos resistores:

$$P_{R_1} = V_{R_1} \times I_{R_1}$$
$$P_{R_2} = V_{R_2} \times I_{R_2}$$

Do circuito, obtêm-se os dados necessários para os cálculos :

$$P_{R_1} = 4{,}2\text{V} \times 0{,}089\text{A} = 0{,}37\text{W (dissipação real)}$$
$$P_{R_2} = 5{,}8\text{V} \times 0{,}0085\text{A} = 0{,}049\text{W (dissipação real)}$$

Deve-se usar resistores com potência de dissipação máxima pelo menos duas vezes maior que a dissipação real. O diagrama final do divisor é o mostrado na figura abaixo :



<u>Exemplo 2</u>:

Precisa-se alimentar uma carga de 400Ω e 12V a partir de uma fonte de 20V, utilizando-se um divisor de tensão. Projete o circuito necessário.

<u>Solução</u>:

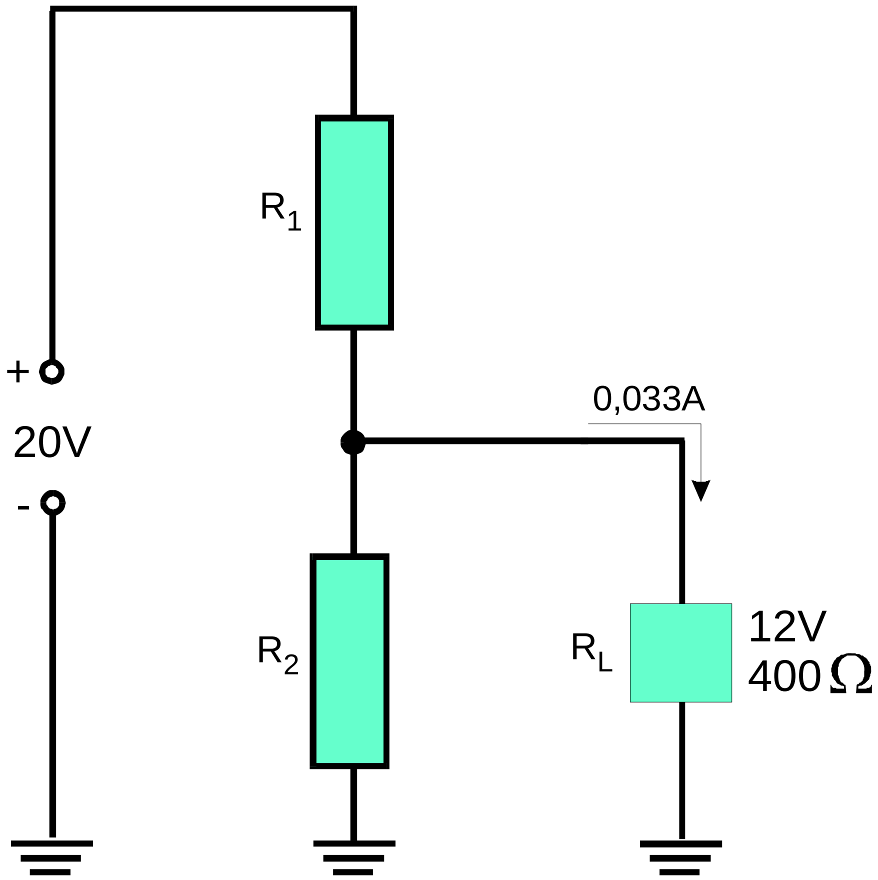
Dados obtidos no enunciado:

- Tensão de entrada : $20V_{CC}$.
- Tensão de saída : $12V_{CC}$.

Corrente da carga

$$I_{R_L} = \frac{V_{R_L}}{R_L} = \frac{12}{400} = 0{,}033\text{A}$$

A figura mostra o diagrama do divisor :



Dimensionamento de R_2

$$R_2 = \frac{V_{R_2}}{I_{R_2}}$$

$$V_{R_2} = V_{R_L} = 12V$$

$$I_{R_2} = 0{,}015A \ldots \text{por hipótese}$$

$$R_2 = \frac{12}{0{,}015} = 800\Omega$$

Dimensionamento de R_1

$$R_1 = \frac{V_{R_1}}{I_{R_1}}$$

$$V_{R_1} = V_{cc} - V_{Saída} = 20 - 12 = 8V$$

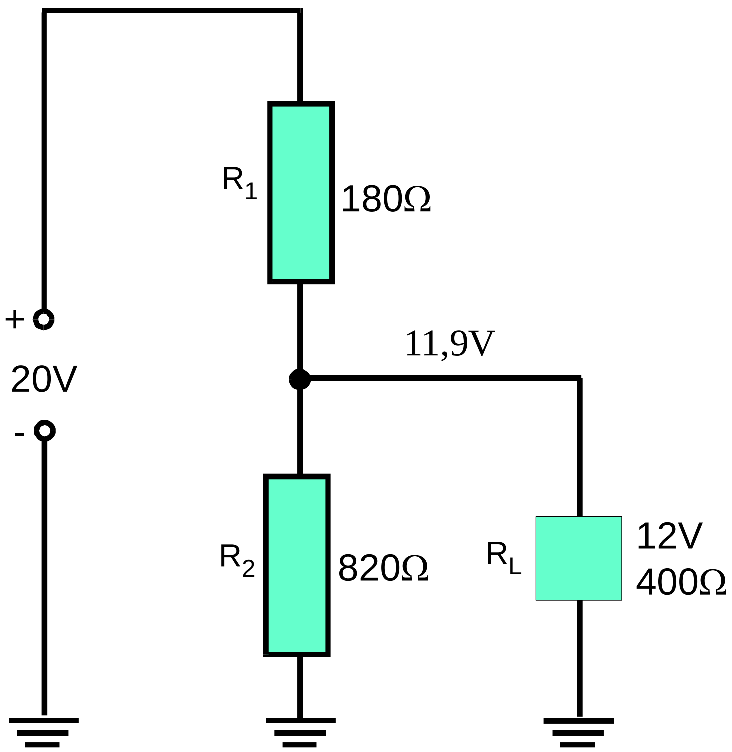
$$I_{R_1} = 0{,}015 + 0{,}03 = 0{,}045A$$

$$R_1 = \frac{8}{0{,}045} = 177\Omega$$

Padronizando os valores dos resistores, para os valores comerciais maiores, tem-se:

$$R_2 = 820\Omega$$
$$R_1 = 180\Omega$$

Recalculando as tensões com os valores padronizados, obtêm-se os valores indicados na figura abaixo :



Determinando-se a potência dos resistores, tem-se:

$$P_{R_1} = V_{R_1} \times I_{R_1}$$

$$V_{R_1} = 20 - 11{,}9 = 8{,}1\text{V}$$

$$I_{R_1} = \frac{V_{R_1}}{R_1} = \frac{8{,}1}{180} = 0{,}0445\text{A}$$

$$P_{R_1} = 8{,}1 \times 0{,}0445 = 0{,}36\text{W (dissipação real)}$$

$$P_{R_2} = V_{R_2} \times I_{R_2}$$

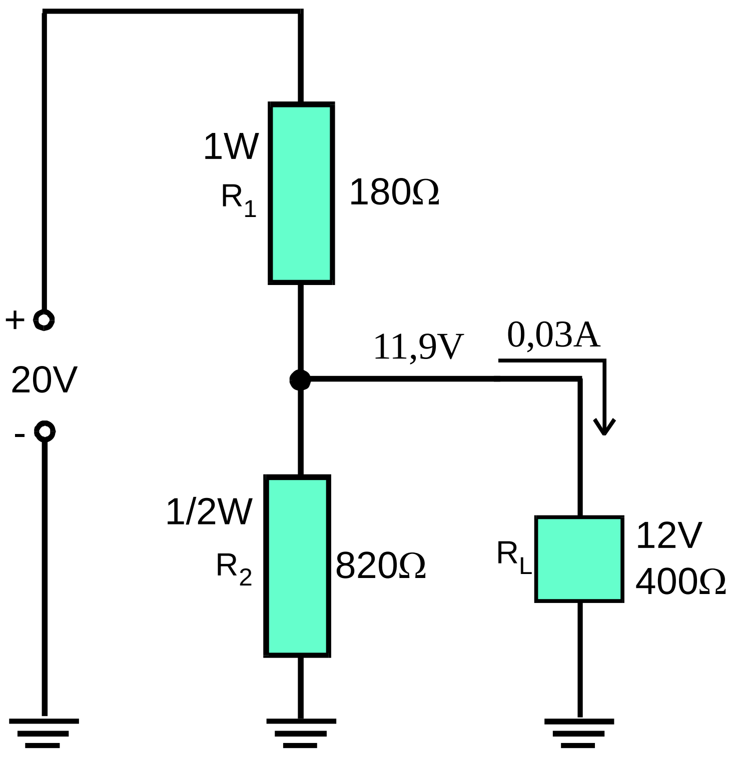
$$V_{R_2} = V_{R_L} = 11{,}9\text{V}$$

$$I_{R_2} = \frac{V_{R_2}}{R_2} = \frac{11{,}9}{820} = 0{,}0145\text{A}$$

$$P_{R_2} = 11{,}9 \times 0{,}0145 = 0{,}173\text{W (dissipação real)}$$

Portanto, R_1 pode ser de 1W e R_2 de 1/2W.

O esquema final do divisor é mostrado abaixo :



Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Qual a utilidade de um divisor de tensão ?

2. Quais os dados necessários para o dimensionamento dos componentes de um divisor de tensão ?

BIBLIOGRAFIA

SENAI/DN - **Reparador de Circuitos Eletrônicos**; Eletrônica Básica I. Rio de Janeiro. (Coleção Básica SENAI. Módulo 1).

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

A busca constantes da qualidade e a preocupação com o atendimento ao cliente estão presentes nas ações do *SENAI*.

Introdução

Os aparelhos eletrônicos, tantos destinados ao lazer (televisores, rádios etc.) como as funções técnicas e científicas (multímetros, fontes etc.), apresentam controles que permitem ao usuário ajustar o funcionamento de forma adequada. Como exemplos desses controles, pode-se citar:

- Aqueles dos aparelhos destinados ao lazer: controles de volume, brilho, graves e agudos.
- Aqueles dos aparelhos científicos: controle de ajuste de zero nos multímetros.

Na realidade, esses controles estão associados a componentes eletrônicos cujo valor não é fixo, sendo ajustado de acordo com a necessidade. Os potenciômetros são exemplos típicos desse tipo de componentes. Existem ainda componentes destinados a ajustes internos no equipamento, aos quais o usuário não tem acesso. Um exemplo típico são os resistores ajustáveis.

Para que os efeitos provocados por estes componentes em um circuito eletrônico possam ser compreendidos, faz-se necessário, em primeiro lugar, conhecer estes componentes e suas características.

Este fascículo foi elaborado para facilitar o seu conhecimento e compreensão dos resistores ajustáveis e potenciômetros, visando capacitá-lo a identificar e utilizar corretamente estes componentes.

Para ter sucesso no desenvolvimento do conteúdo e atividades deste fascículo, o leitor já deverá ter conhecimento relativos a :

- Resistores.
- Divisores de tensão.

RESISTORES AJUSTÁVEIS

São resistores cujo valor de resistência pode ser ajustado, dentro de uma faixa pré-definida. A **Fig.1** mostra alguns resistores ajustáveis.

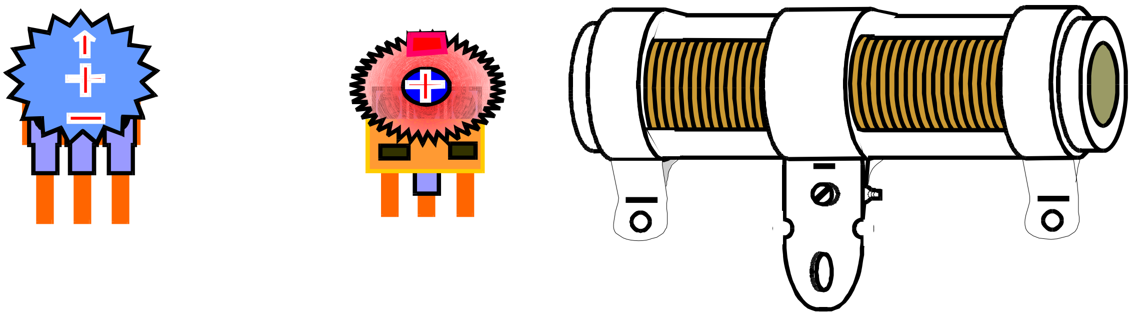


Fig.1 Exemplo de resistores ajustáveis.

Estes tipos de resistores são utilizados em circuitos que exijem calibração. Existem dois tipos de resistores ajustáveis:

- Resistor ajustável de fio (**Fig.2**).
- Trimpot (**Fig.3**).

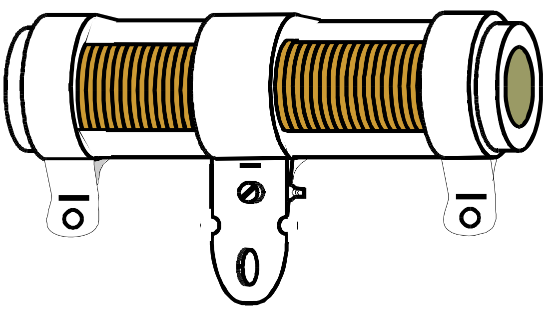


Fig.2 Resistor ajustável de fio.

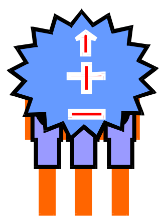


Fig.3 Trimpot.

A constituição física dos resistores ajustáveis não é preparada para suportar trocas de valor freqüentes. Este tipo de componente é utilizado em pontos de um circuito onde o ajuste é feito uma vez e não é mais alterado.

Os resistores ajustáveis (de fio e trimpot) são usados para ajustes definitivos nos circuitos.

RESISTORES AJUSTÁVEIS DE FIO

É um resistor de fio ao qual foi acrescentado um terceiro terminal, denominado de cursor, como mostrado na **Fig.4**.

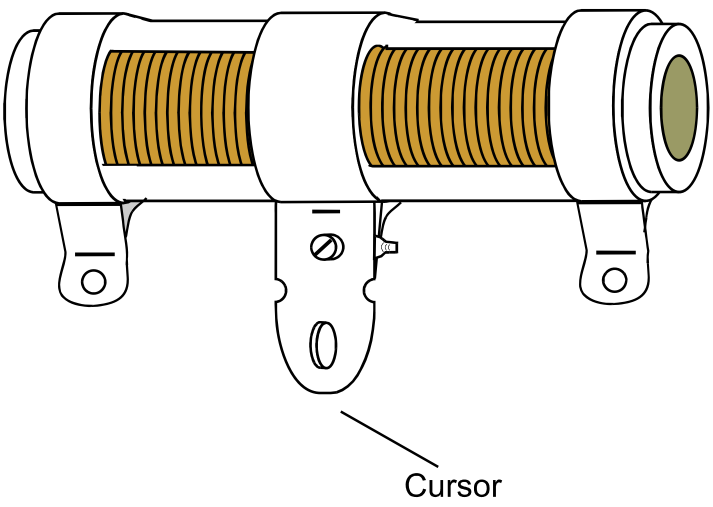


Fig.4 Resistor ajustável de fio.

Esse terminal móvel desliza em contato elétrico com as espiras de fio que constituem o resistor podendo ser fixado na posição desejada. Os resistores ajustáveis de fio, em geral, dissipam grande quantidade de calor porque trabalham com correntes elevadas.

Por essa razão, normalmente são montados em locais com boa ventilação, sendo ligados ao circuito através de condutores, como mostrado na **Fig.5**.

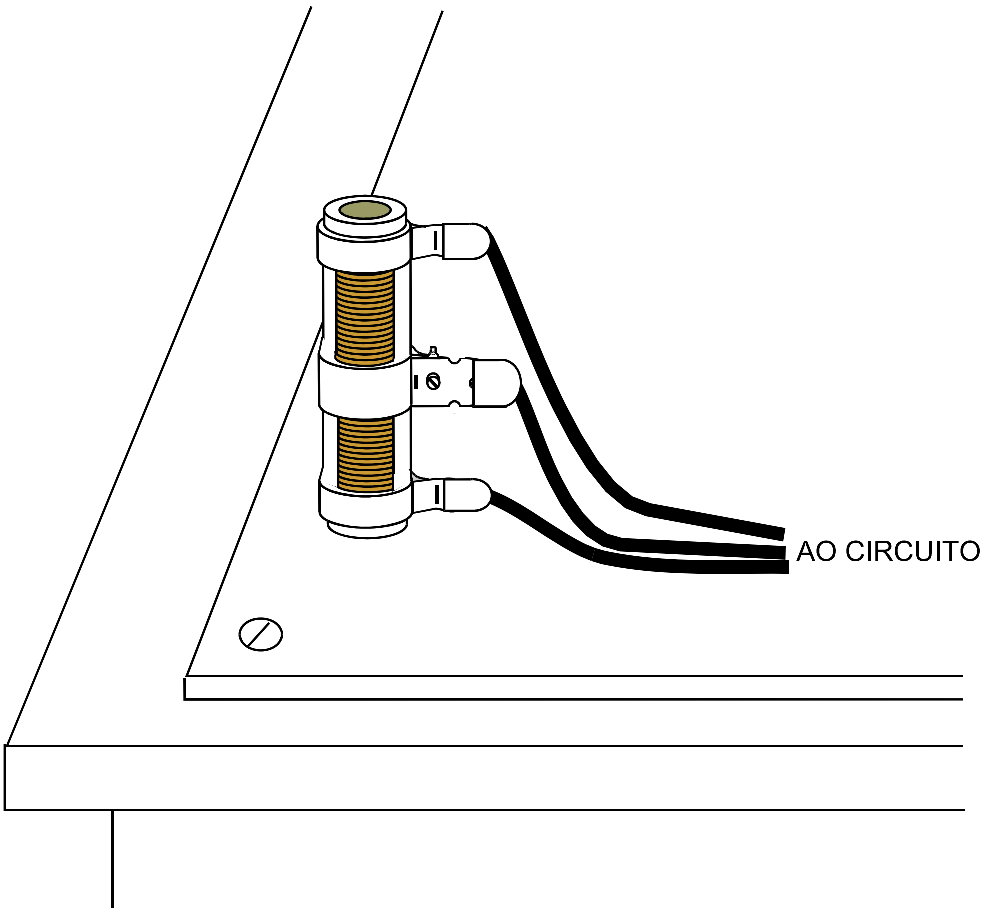


Fig.5 Condutores de ligação do resistor ajustável de fio.

TRIMPOT

É um tipo de resistor ajustável utilizado em pontos de ajuste onde as correntes são pequenas (da ordem de miliampères ou menos). A **Fig.6** mostra dois tipos de trimpots.

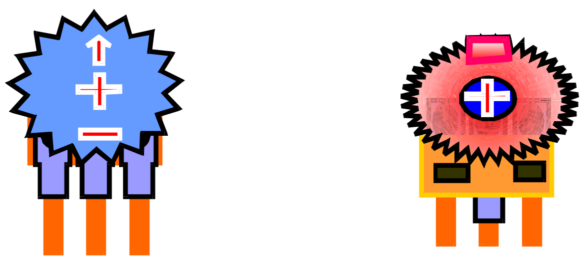


Fig.6 Tipos de trimpots.

Pelo fato de dissiparem pequenas quantidades de calor, os trimpots podem ser montados no próprio circuito onde estão atuando, como ilustrado na **Fig.7**.

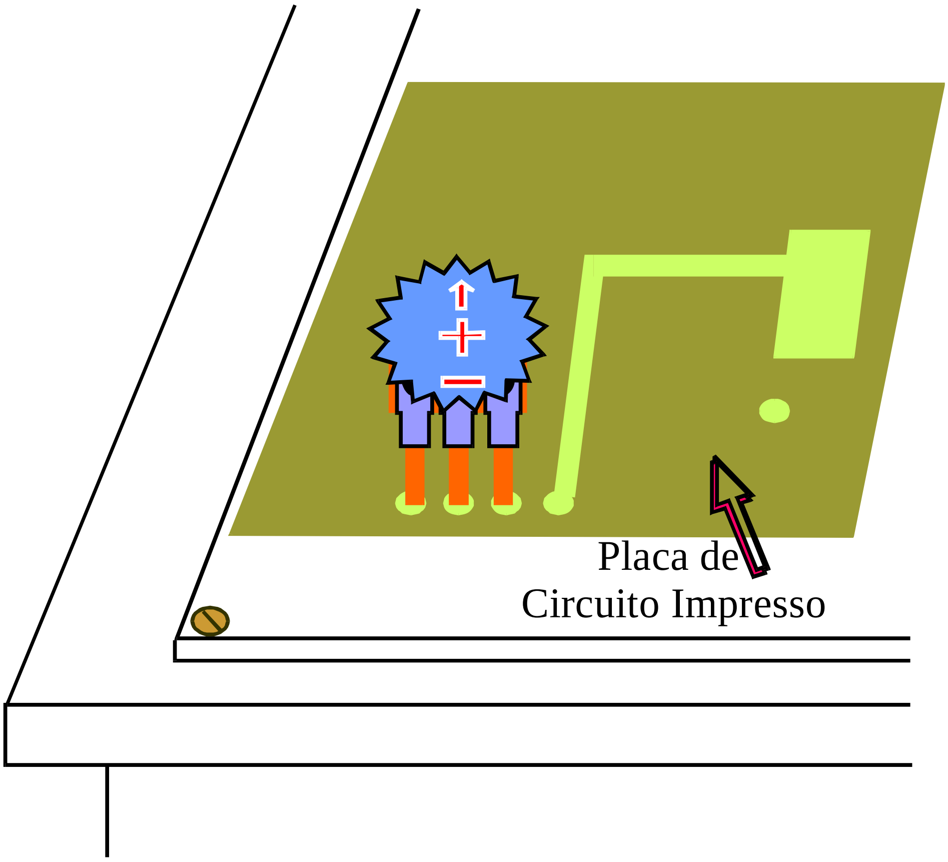


Fig.7 Montagem do trimpot numa placa de circuito impresso.

Existem trimpots verticais e horizontais, de forma a permitir uma opção para uma montagem mais adequada a cada aplicação. A **Fig.8** mostra trimpots desses dois tipos.

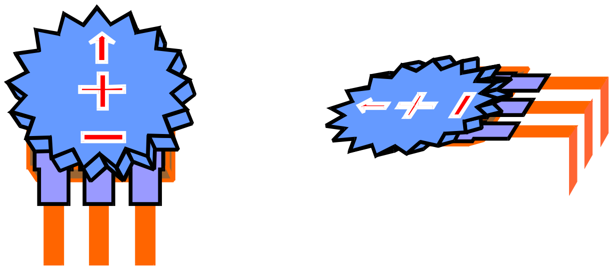


Fig.8 Trimpot vertical e trimpot horizontal.

CARACTERÍSTICAS DOS RESISTORES AJUSTÁVEIS

Os resistores ajustáveis apresentam impresso no corpo o valor de resistência entre os dois terminais extremos, conforme ilustrado na **Fig.9**.

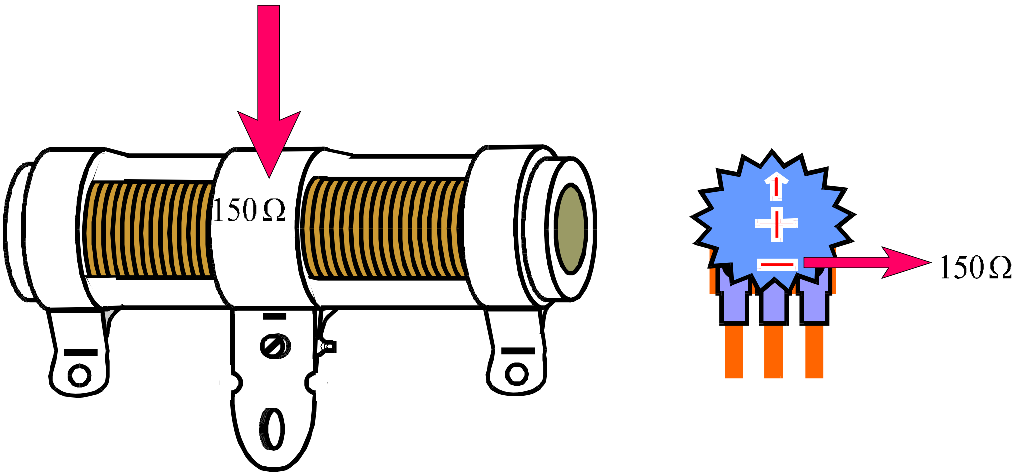


Fig.9 Indicação do valor dos resistores variáveis.

A resistência entre os terminais extremos de um resistor ajustável é a mesma, qualquer que seja a posição do cursor. Para obter-se um valor de resistência menor que o valor total de um resistor ajustável, utiliza-se um dos terminais extremos e o cursor, como mostrado na **Fig.10**.

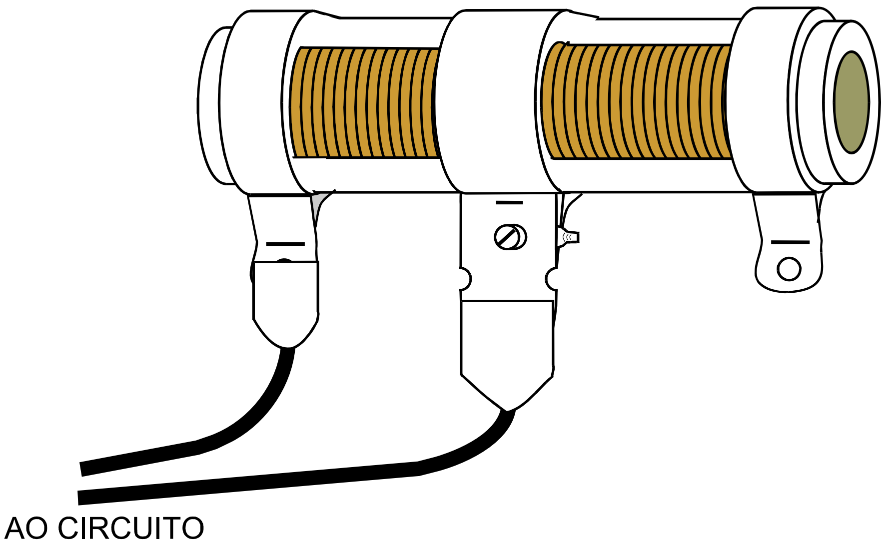


Fig.10 Utilização dos terminais extremos e o cursor.

Dessa forma, a resistência ôhmica da parte utilizada será menor que a resistência de todo resistor.

Observando-se, por exemplo, um resistor ajustável de 100Ω entre os extremos e posicionando-se o terminal deslizante no centro, mede-se então uma resistência de 100Ω, como ilustrado na **Fig.11**.

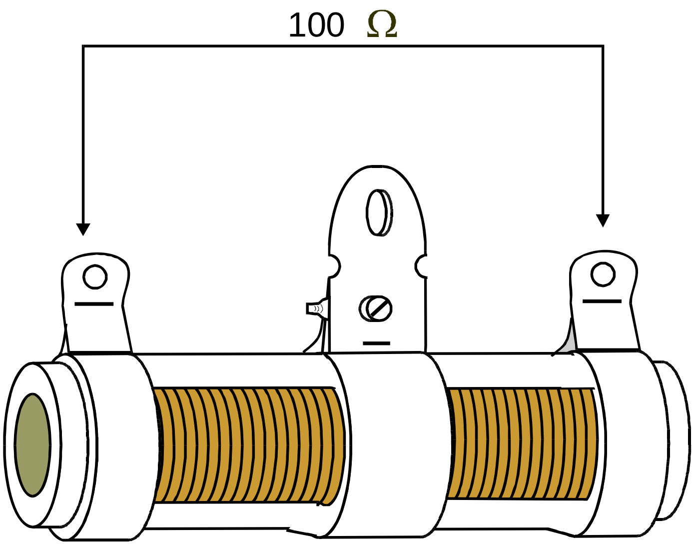


Fig.11 Cursor posicionado no centro de um resistor ajustável de 100Ω.

Os outros 50Ω, que completam o valor total do resistor, estão na parte do resistor que não será utilizada, como pode ser visto na **Fig.12**.

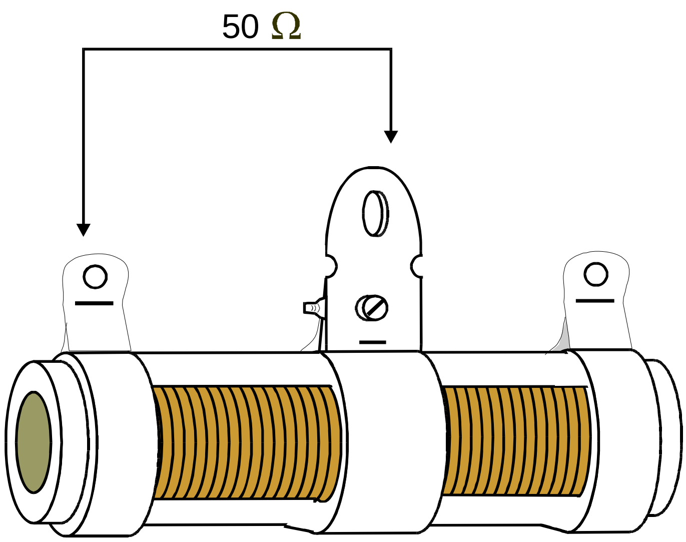


Fig.12 Indicação do restante da resistência total do resistor ajustável.

Através do ajuste correto da posição do cursor, pode-se obter os mais diversos valores de resistência a partir de um resistor ajustável (valores sempre menores que o extremo).

Os resistores ajustáveis se comportam como dois resistores em série, com uma ligação central, como ilustrado na **Fig.13**.

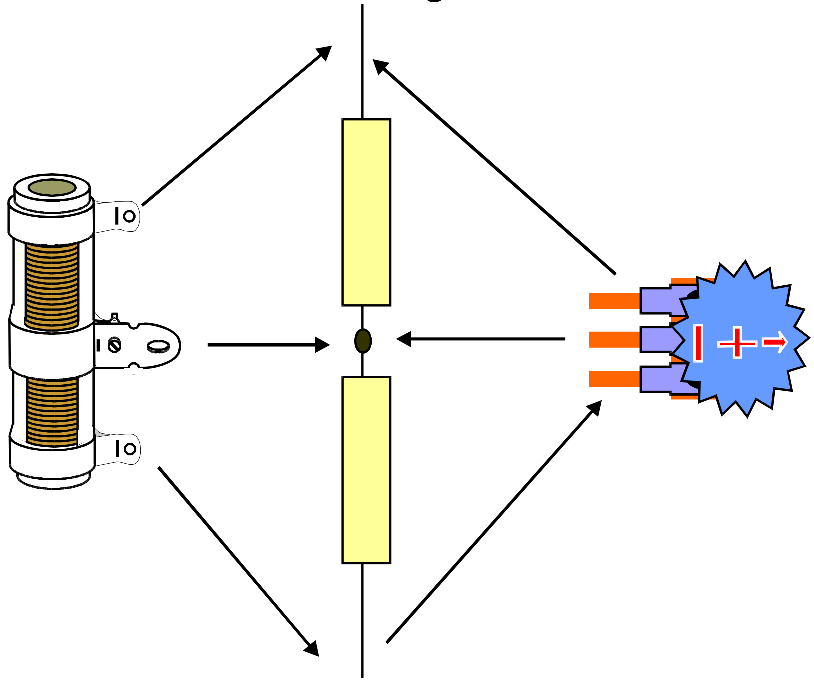


Fig.13. Dois resistores em série compondo um resistor ajustável.

SIMBOLOGIA

Os resistores ajustáveis são representados pelos símbolos apresentados na **Fig.14**.

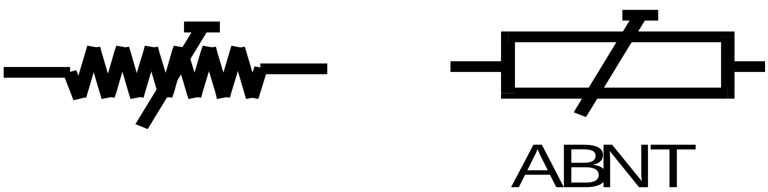


Fig.14 Símbolos dos resistores ajustáveis.

Nos esquemas, o valor ôhmico que aparece ao lado do símbolo dos resistores ajustáveis corresponde à resistência entre os terminais extremos (valor máximo).

POTENCIÔMETROS

São resistores com derivação que permite a variação do valor resistivo pelo movimento de um eixo. A **Fig.15** mostra alguns tipos de potenciômetros.

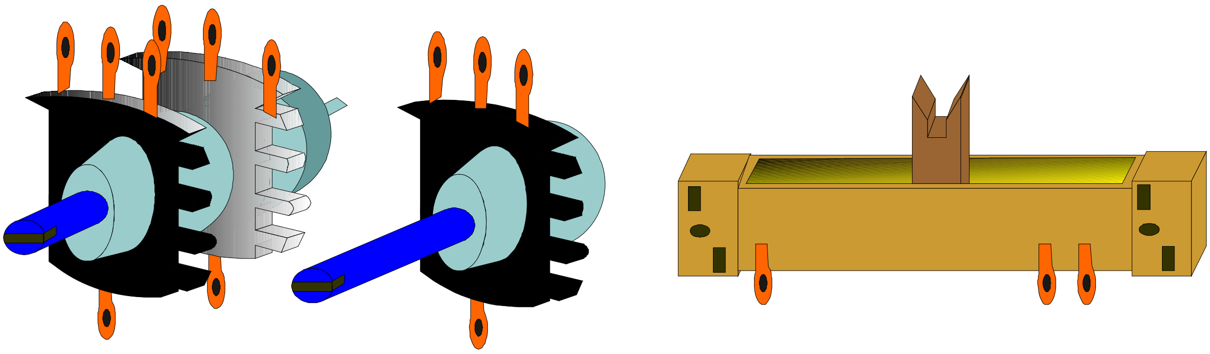


Fig.15 Tipos de potenciômetros.

Os potenciômetros são usados nos equipamentos para permitir a mudança do regime de operação.

Por exemplo, o potenciômetro de volume permite o aumento ou diminuição do nível de intensidade do som. Já o potenciômetro de brilho permite o controle de luminosidade das imagens.

FUNCIONAMENTO

Entre os dois terminais extremos o potenciômetro é um resistor comum. Sobre esse resistor desliza um 3º terminal, chamado de cursor, que permite utilizar apenas uma parte da resistência total do componente (de um extremo até o cursor).

SIMBOLOGIA

A **Fig.16** mostra os símbolos utilizados para representar os potenciômetros, salientando o símbolo normalizado pela ABNT.

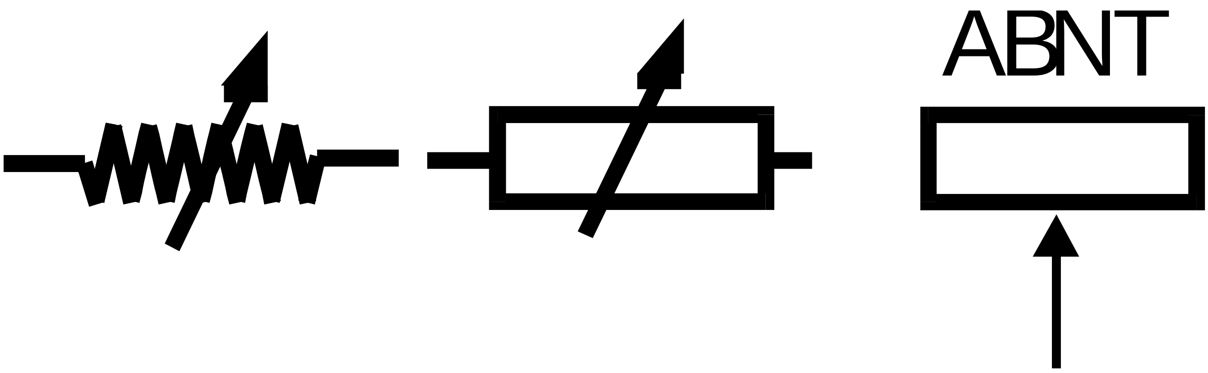


Fig.16 Símbolos dos potenciômetros.

A diferença entre os símbolos dos resistores ajustáveis e potenciômetros aparece na ponta do traço diagonal.

Os componentes cujo valor está sujeito à modificação constante (potenciômetros usados no controle de volume, por exemplo) são denominados **variáveis**. Nos seus símbolos aparece uma seta na ponta do traço diagonal.

Os componentes cujo valor de resistência é ajustado na calibração e não sofre mais alteração, são chamados de **ajustáveis**. O resistor ajustável é um exemplo característico desse tipo de componente.

TIPOS DE POTENCIÔMETROS

Existem dois tipos de potenciômetros:

- De fio.
- De carbono (linear ou logarítmico).

POTENCIÔMETRO DE FIO

Sobre uma tira de fibra em forma de anel são enroladas várias espiras de fio especial (com resistividade elevada). Fixam-se terminais nas extremidades da fibra e as pontas do fio formam um resistor, conforme ilustrado na **Fig.17**.

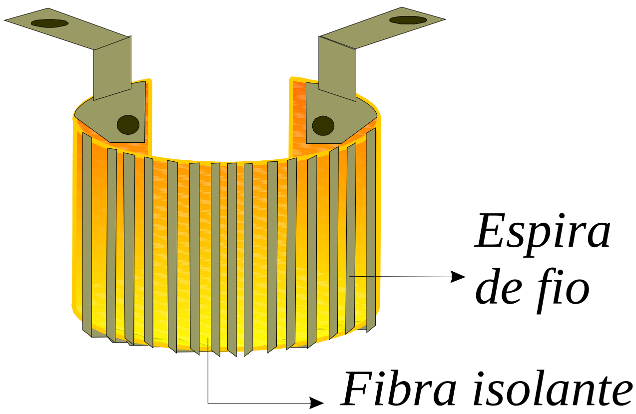


Fig.17 Tira de fibra, espira de fio e terminais de um potenciômetro de fio.

Sobre o topo da fibra corre o contato móvel do cursor, que é ligado mecanicamente ao eixo do componente. O cursor é ligado ao terminal do potenciômetro, como mostrado na **Fig.18**.

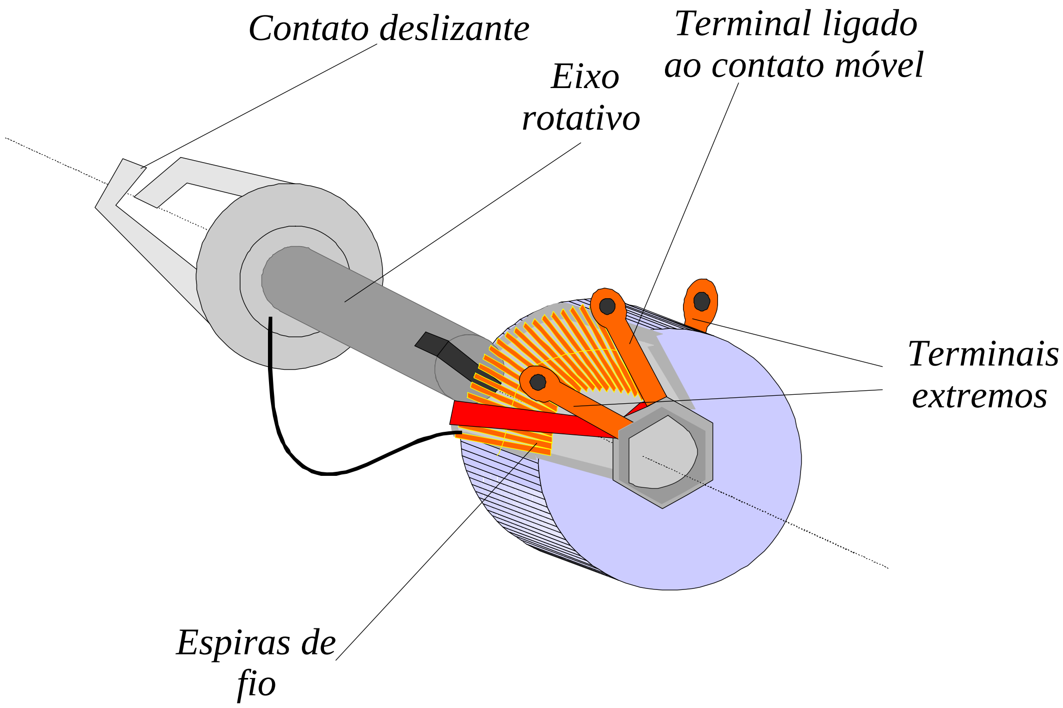


Fig.18 Detalhes dos componentes básicos de um potenciômetro.

Os potenciômetros de fio para circuitos eletrônicos são encontrados em valores de até 22kΩ de resistências e potências de dissipação de até 4W.

Nos potenciômetros de fio a resistência entre o cursor e os extremos varia uniformemente com o movimento do eixo.

Se o eixo for movimentado até a metade do curso total, a resistência entre o cursor e os extremos é a metade da resistência total. Por outro lado, se o cursor for movimentado de 1/4 do curso total em relação a um extremo, a resistência entre este extremo e o cursor é 1/4 da resistência total. Entre o outro extremo e o cursor haverá portanto 3/4 da resistência, como ilustrado na **Fig.19**.

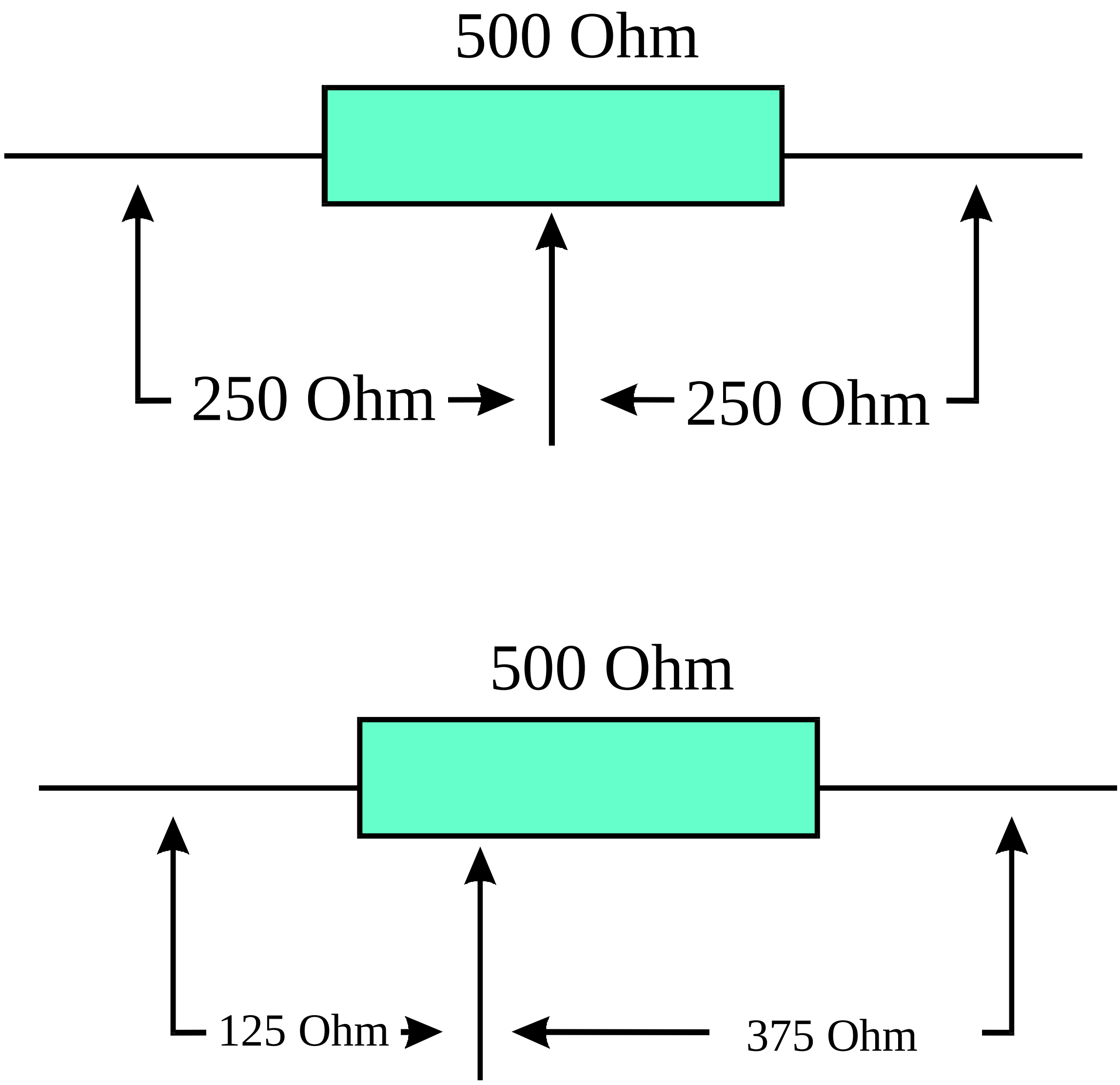


Fig.19 Valores de resistência para diversas posições do cursor.

Componentes com esta característica são chamados de **lineares**. Portanto, os potenciômetros de fio sempre são lineares.

Nos potenciômetros lineares, a variação da resistência é proporcional ao movimento do eixo.

POTENCIÔMETRO DE CARBONO (CARVÃO)

São semelhantes aos potenciômetros de fio na sua construção. Diferem apenas em um aspecto: nos potenciômetros de carvão as espiras de fio especial (do potenciômetro de fio) são substituídas por uma camada de carbono que é depositada sobre uma superfície de material isolante, como pode ser visto na **Fig.20**.

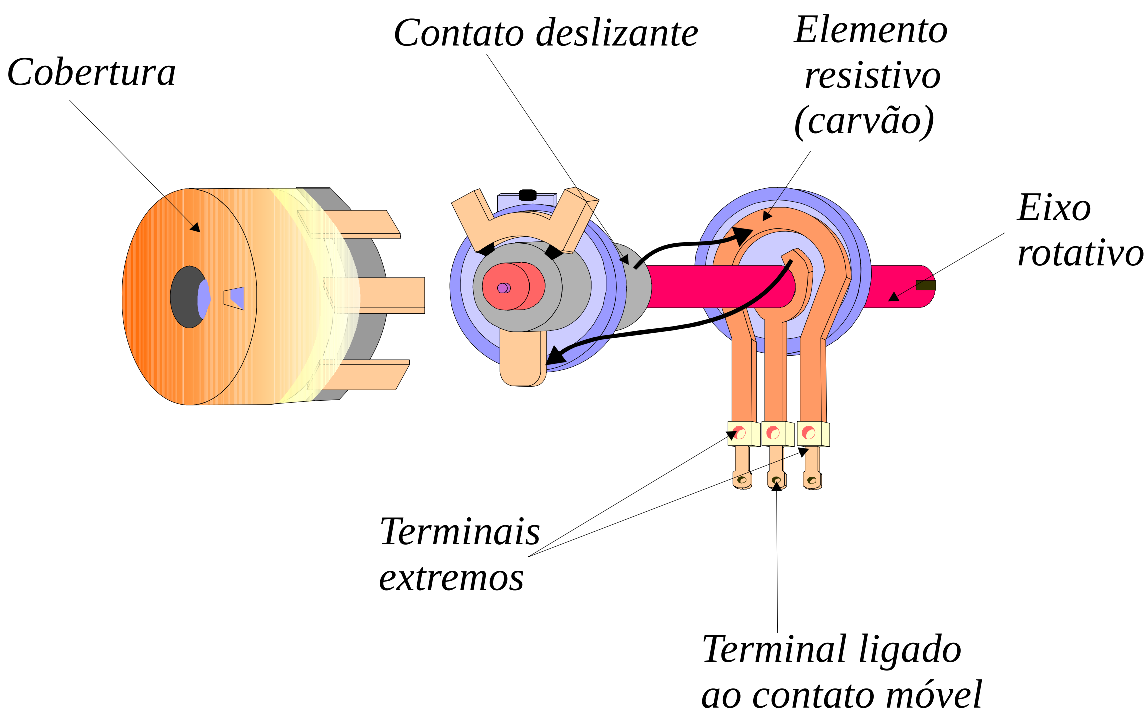


Fig.20 Detalhes construtivos de um potenciômetro de carbono.

Os potenciômetros de carbono podem ser lineares ou logarítmicos. Os potenciômetros de carvão lineares são semelhantes aos de fio, ou seja, a variação da resistência entre um extremo e o cursor é proporcional ao movimento do eixo.

A variação da resistência dos potenciômetros lineares em relação à posição do cursor se apresenta conforme o gráfico da **Fig.21**.

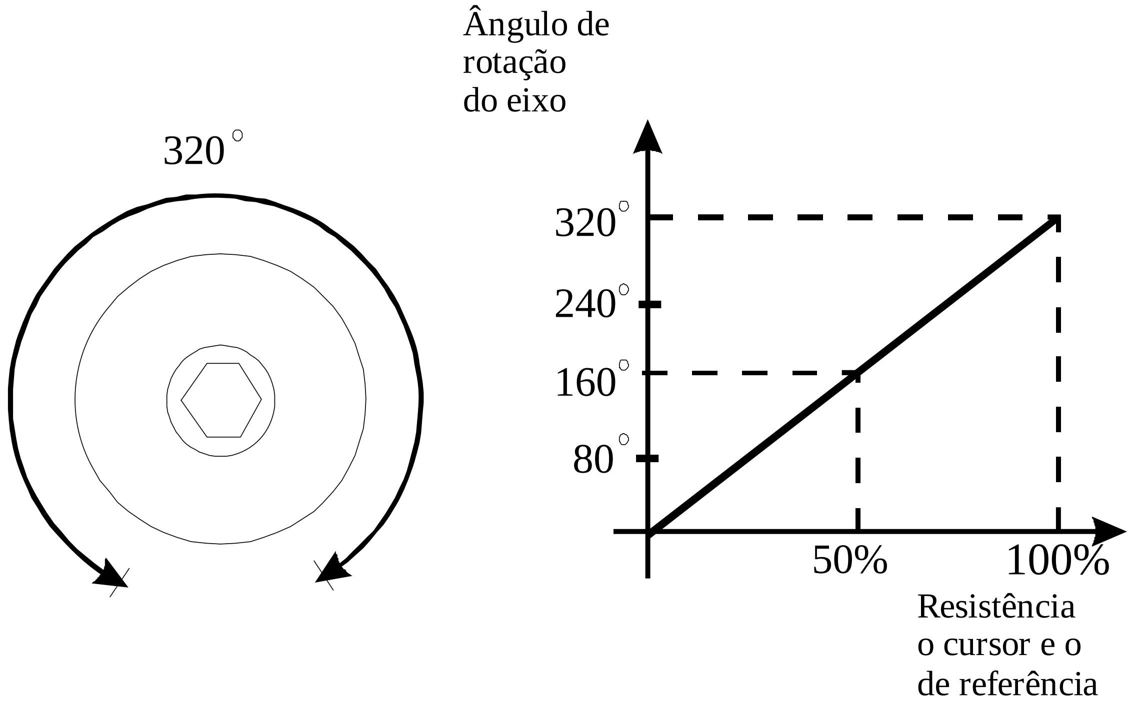


Fig.21 Representação gráfica da variação da resistência com a posição do cursor dos potenciômetros lineares.

Os potenciômetros de carvão logarítmicos se comportam de forma diferente, com respeito à relação entre posição do cursor e resistência.

Quando se inicia o movimento do cursor, a resistência sofre pequena variação. À medida que o cursor vai sendo movimentado, a variação na resistência torna-se cada vez maior.

A variação da resistência entre um extremo e o cursor é desproporcional ao movimento do eixo.

O gráfico da **Fig.22** mostra como a resistência varia com relação à posição do eixo nos potenciômetros logarítmicos.

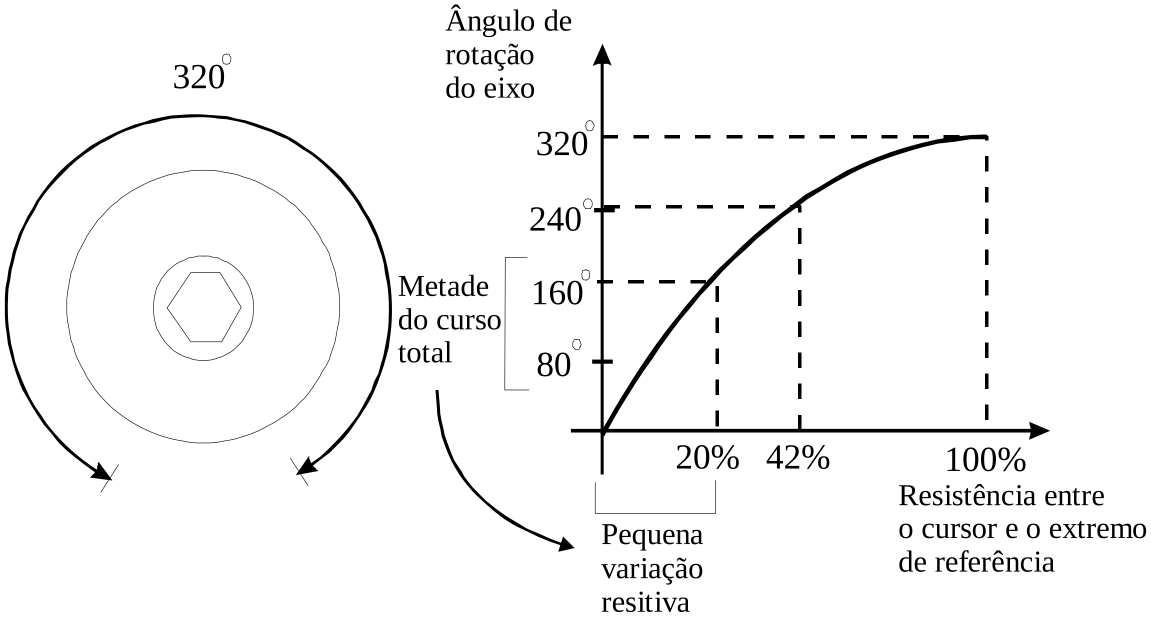


Fig.22 Representação gráfica da variação da resistência com a posição do cursor dos potenciômetros logarítmicos.

Os potenciômetros logarítmicos são usados principalmente em controles de volume.

POTENCIÔMETROS COM CHAVE

Em algumas ocasiões, utiliza-se o potenciômetro para controle de volume e ligação do aparelho. Para cumprir esta finalidade, são fabricados potenciômetros logarítmicos com uma chave presa ao eixo. A **Fig.23** apresenta um potenciômetro logarítmico com chave.

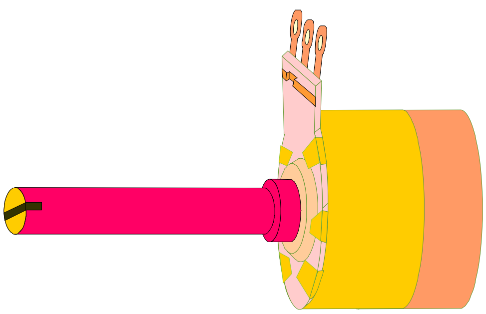


Fig.23 Potenciômetro logarítmico com chave.

POTENCIÔMETROS DUPLOS

Os potenciômetros duplos são utilizados principalmente em aparelhos de som estereofônicos. Existem modelos de potenciômetros duplos em que um único eixo comanda os dois potenciômetros, e também modelos em que cada potenciômetro tem um eixo próprio. Essas concepções podem ser vistas nas **Figs.24** e **25**, respectivamente.

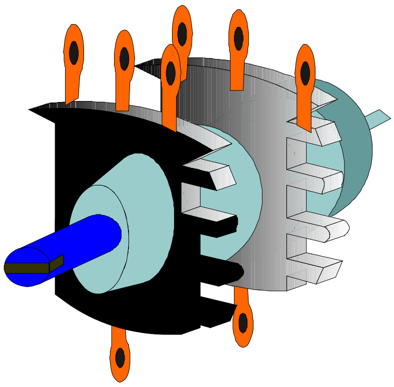


Fig.24 Potenciômetro duplo com um único eixo.

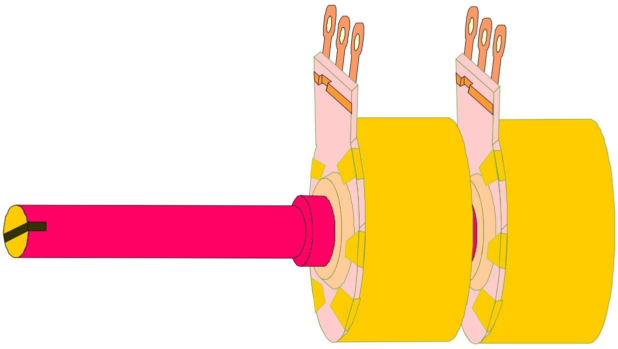


Fig.25 Potenciômetro duplo com eixo duplo.

POTENCIÔMETROS DESLIZANTES

Potenciômetros em que o movimento rotativo do eixo é substituído por um movimento linear do cursor. A **Fig.26** mostra um exemplo.

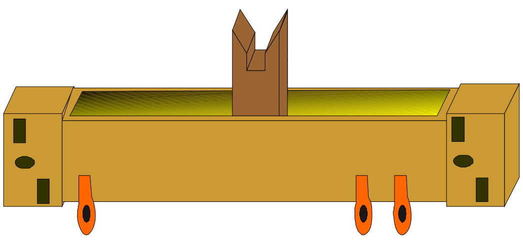


Fig.26 Potenciômetro deslizante.

Aplicação dos resistores ajustáveis e potenciômetros

Os resistores ajustáveis e principalmente os potenciômetros são utilizados principalmente para obtenção de divisores de tensão com tensão de saída variável. A tensão de saída dos divisores é estabelecida pela relação entre os resistores que os compõem.

Incluindo resistores ajustáveis ou potenciômetro na constituição dos divisores, a tensão de saída torna-se variável em função da resistência com que estes elementos são ajustados. Este tipo de divisor é muito utilizado nos pontos dos circuitos que exigem calibração de ponto de operação.

De acordo com a posição do elemento variável, o divisor pode fornecer:

- Um valor de tensão máximo.
- Um valor de tensão mínimo.
- Valores de tensão máximo e mínimo.

DIVISOR DE LIMITE COM TENSÃO MÁXIMA

Quando o divisor variável é colocado no extremo de referência do divisor, fornece tensões que vão desde 0V até um valor especificado menor que a alimentação, como pode ser visto na **Fig.27**.

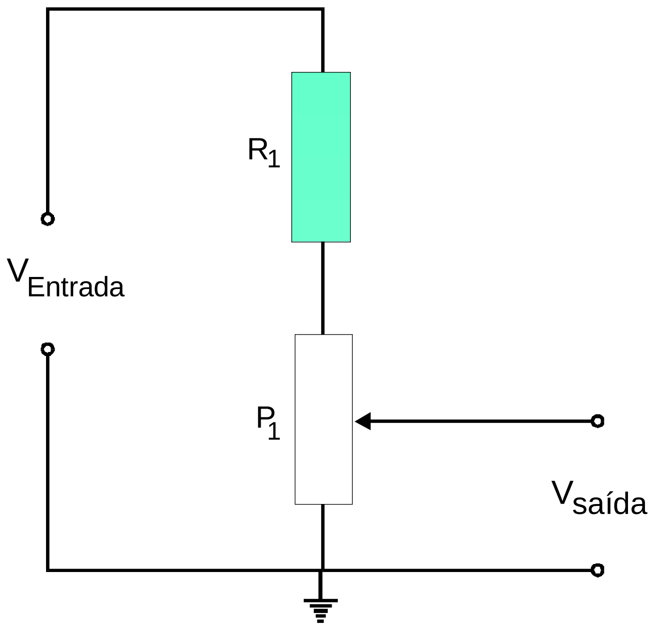


Fig.27 Divisor de limite com tensão máxima.

DIVISOR COM LIMITE DE TENSÃO MÍNIMA

Quando o resistor variável é colocado no extremo da tensão de alimentação, o divisor fornece tensões que vão desde um valor mínimo até o valor da tensão de alimentação, como ilustrado na **Fig.28**.

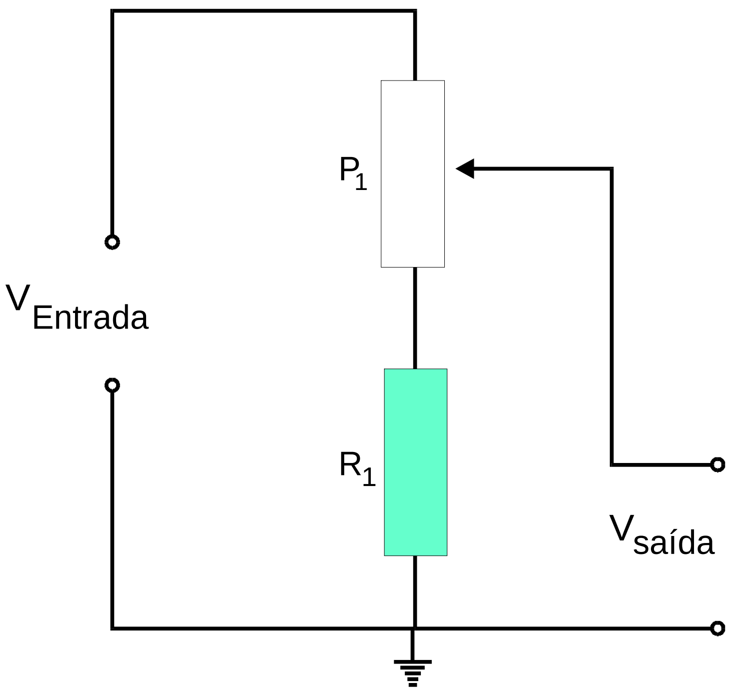


Fig.28 Divisor com limite de tensão mínima.

DIVISOR COM LIMITE DE TENSÃO MÁXIMA E MÍNIMA

O resistor variável é colocado entre outros resistores fornecendo tensões entre um valor mínimo e máximo maiores que 0V e menores que *V*cc, como mostrado na **Fig.29**.

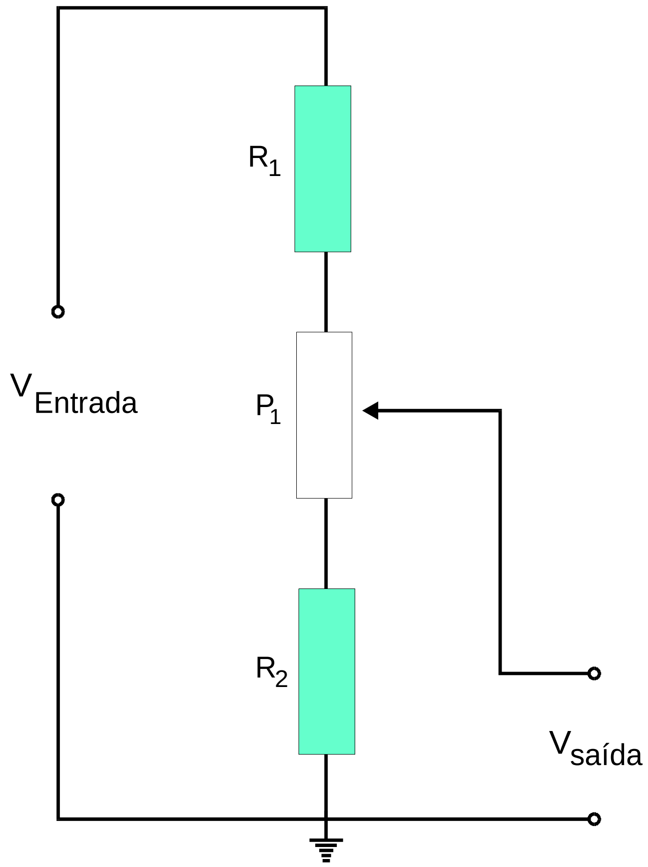


Fig.29 Divisor com limite de tensão máxima e mínima.

ESPECIFICAÇÃO DE RESISTORES AJUSTÁVEIS E POTENCIÔMETROS

Os resistores ajustáveis são especificados por:

- Valor e potência de dissipação para os de fio (por exemplo, resistor ajustável de 100Ω, 5W).
- Valor e posição de montagem para os trimpots (por exemplo, trimpot de 10kΩ, trimpot de 480Ω horizontal). Normalmente para a montagem na vertical a posição não é especificada.

Os potenciômetros são especificados por:

- Apenas o valor para os de fio (por exemplo, potenciômetro de fio 30Ω).

- Valor, tipo, característica de resposta e chave, quando necessário, para os de carbono (por exemplo, potenciômetro de 10kΩ linear, potenciômetro de 470kΩ logarítmico, potenciômetro de 10kΩ logarítmico com chave).

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Quando se usam os resistores ajustáveis em um circuito ?
2. Quais os tipos de resistores ajustáveis conhecidos ?
3. Que são potenciomêtros ?
4. Quando são os potenciomêtros usados ?

BIBLIOGRAFIA

SENAI/DN **Reparador de Circuitos Eletrônicos**, Eletrônica Básica I. Rio de Janeiro (Coleção Básica SENAI. Módulo 1).

VAN VALKENBURG, NOOGER & NEVILLE. **Eletricidade Básica**. 15.ª ed., São Paulo, Freitas Bastos, 1979, vol.l.

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

A busca constantes da qualidade e a preocupação com o atendimento ao cliente estão presentes nas ações do *SENAI*.

Introdução

O técnico ou reparador de circuitos eletrônicos utiliza, no seu dia a dia, instrumentos de medição, tais como multímetros, voltímetros e assim por diante. Entretanto, no transcorrer da vida profissional ocorrem situações em que estes instrumentos usuais não são adequados, fazendo-se necessária a utilização de instrumentos mais sofisticados.

Um bom exemplo de equipamento sofisticado com o qual os profissionais de eletrônica se deparam é a **ponte de medição** através das quais se pode, por exemplo, realizar uma medição precisa de valores de resistência elétrica.

Este fascículo tratará do circuito de ponte balanceada que é o princípio básico das pontes de medição, mesmo das mais sofisticadas, objetivando propiciar-lhe conhecimentos na forma básica de operação dos equipamentos de medição de precisão.

Para ter sucesso no desenvolvimento do conteúdo e atividades deste fascículo, o leitor deverá ter conhecimentos relativos a:

- Divisores de tensão.
- Potenciômetros.

Circuito de ponte balanceada

A ponte balanceada é um circuito destinado à determinação dos valores de resistência ôhmica desconhecidos por comparação com valores conhecidos.

O circuito de ponte balanceada utilizado com alimentação em CC é a base dos equipamentos de precisão para medição de valores de resistência elétrica.

CONFIGURAÇÃO DO CIRCUITO

O circuito de ponte balanceada se compõe basicamente de 4 resistores (dos quais 1 é desconhecido) ligados a uma fonte de CC. Cada dois resistores formam um ramal que é conectado à tensão CC, como pode ser visto na **Fig.1**.

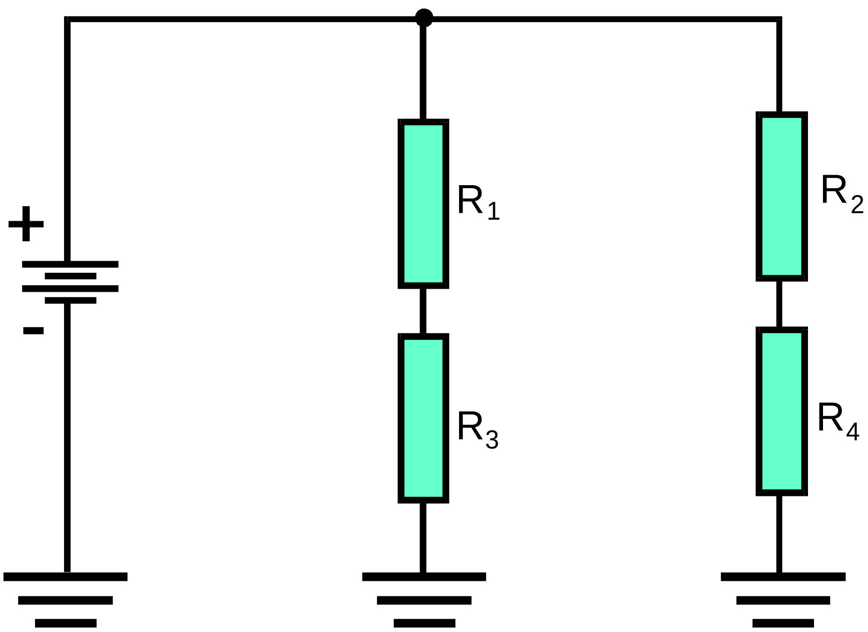


Fig.1 Circuito de ponte.

Entre os pontos centrais de cada braço é colocado um instrumento de medição (normalmente um voltímetro de zero central), conforme ilustrado na **Fig.2**.

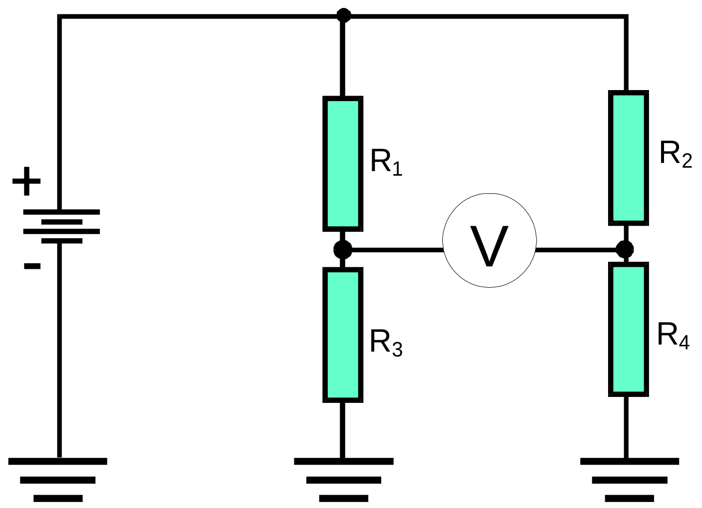


Fig.2 Circuito de ponte com instrumento de medição.

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O princípio de funcionamento de uma ponte balanceada baseia-se na divisão da tensão de alimentação nos dois ramais.

Suponha inicialmente que todos os valores de resistência sejam iguais, conforme mostra o circuito da **Fig.3**.

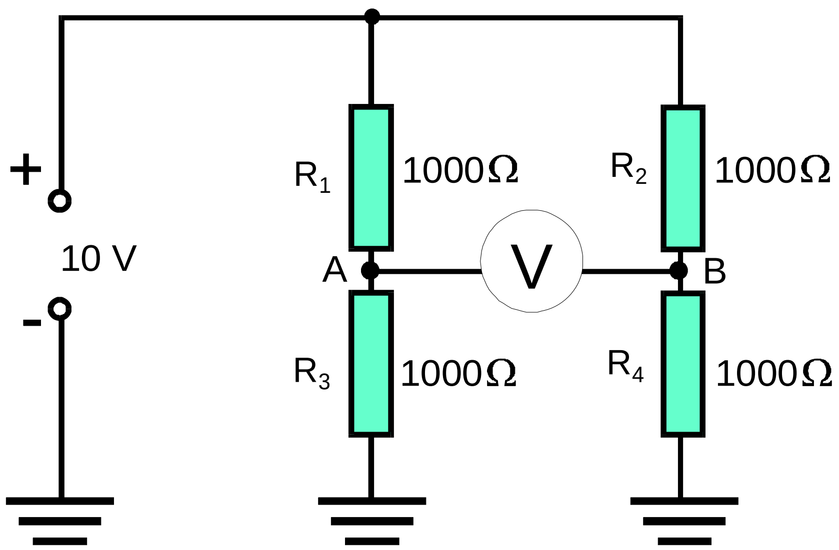


Fig.3 Ponte com todos os valores de resistência iguais.

No ramal da esquerda, a tensão no ponto A é a metade da tensão de alimentação V_{CC}, como mostrado em detalhe na **Fig.4**.

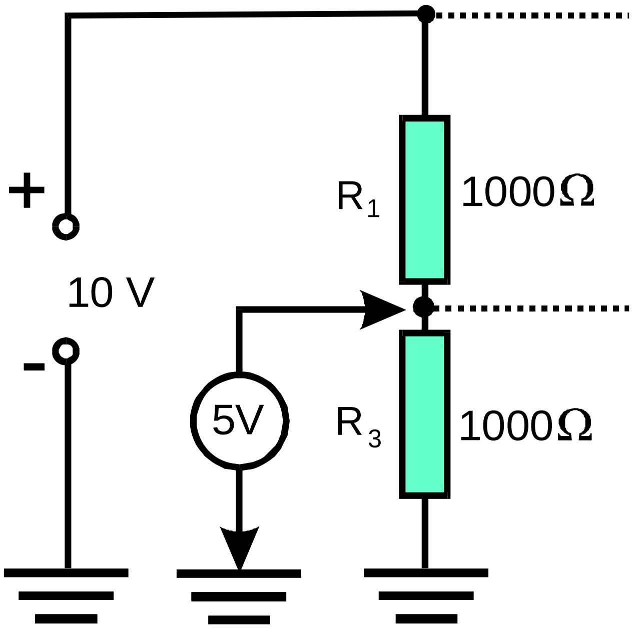


Fig.4 Tensão no ponto A da **Fig.3**.

Da mesma forma, no ramal da direita a tensão no ponto B é também a metade de V_{CC}, como pode ser visto no detalhe da **Fig.5**.

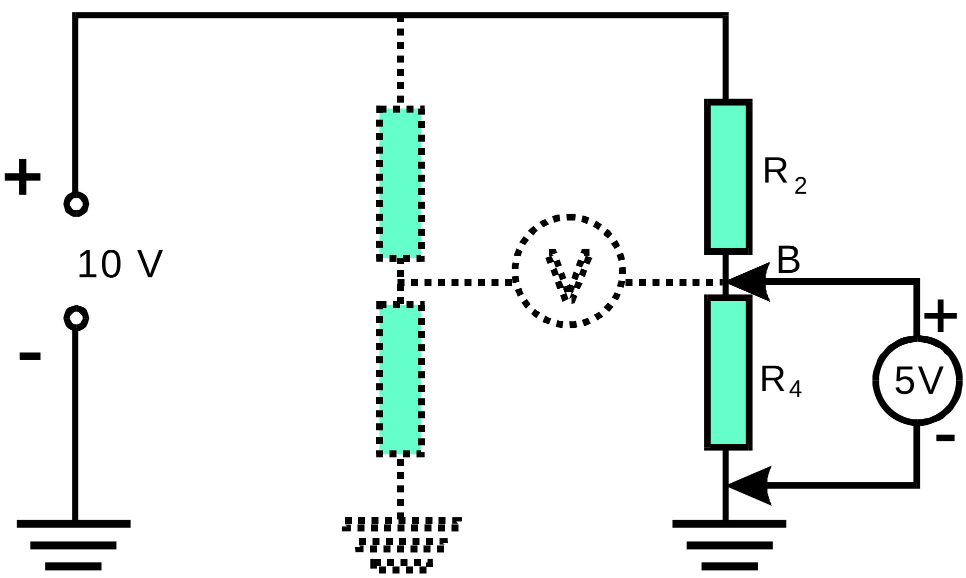


Fig.5 Tensão no ponto B da **Fig.3**.

O voltímetro conectado entre os dois ramais, cuja finalidade é medir a diferença de potencial entre os dois pontos, indica 0V porque estes dois pontos estão a um mesmo potencial elétrico (+5V), como se pode ver na **Fig.6**.

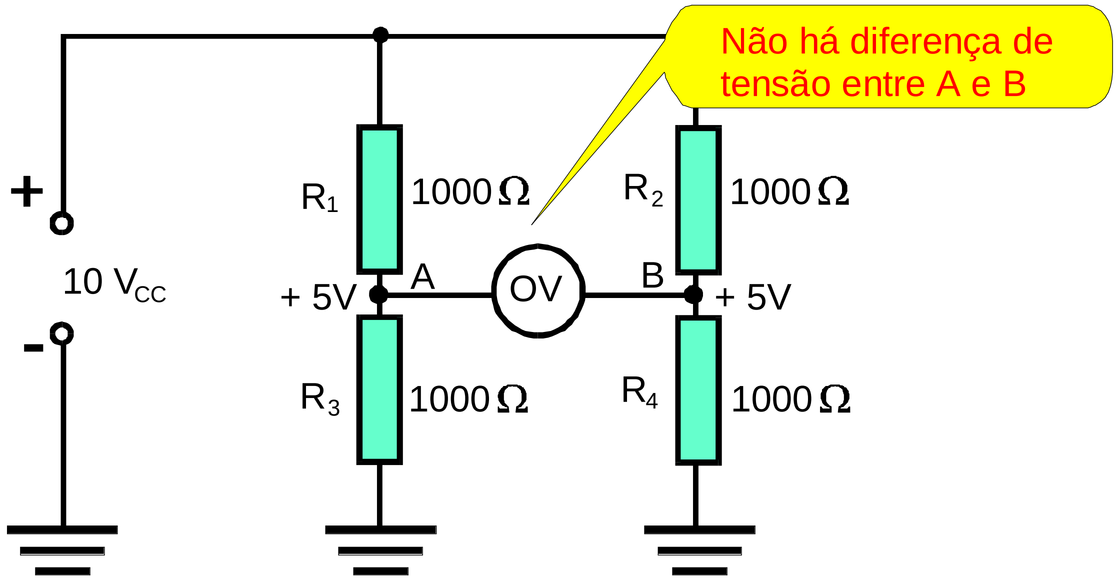


Fig.6 Indicação da diferença de potencial entre os pontos A e B.

Tendo em vista que a divisão de tensão em cada ramal depende apenas dos valores de resistência que o compõem, a mesma situação (indicação 0V) aconteceria nos circuitos mostrados na **Fig.7**.

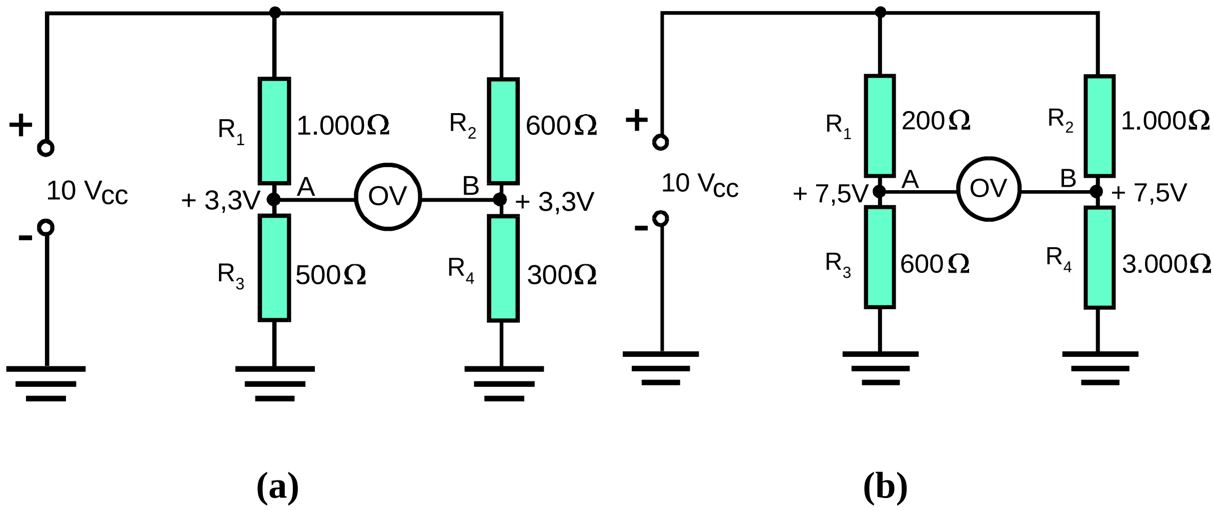


Fig.7 Circuitos onde as indicações dos voltímetros são nulas.

Através da seqüência de exemplos mostrados na **Fig.7**, conclui-se que o voltímetro indica **zero** toda vez que os valores de R_3 e R_4 tiverem a mesma proporção que os valores R_1 e R_2.

Na ponte balanceada da Fig.2, se R_1/R_3 = R_2/R_4, então o voltímetro indicará sempre zero.

A relação $\mathbf{R_1/R_3 = R_2/R_4}$ é uma proporção de forma que se os valores de R_1, R_2 e R_3 forem conhecidos, o valor de R_4 pode ser determinado matematicamente:

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4} \qquad (1)$$

$$R_4 = \frac{R_2 \times R_3}{R_1} \qquad (2)$$

Se no lugar de R_4 coloca-se um resistor desconhecido R_x, seu valor pode ser encontrado através da equação:

$$R_x = \frac{R_2 \times R_3}{R_1} \qquad (3)$$

Esta equação pode ser comprovada utilizando o exemplo apresentado na **Fig.8**.

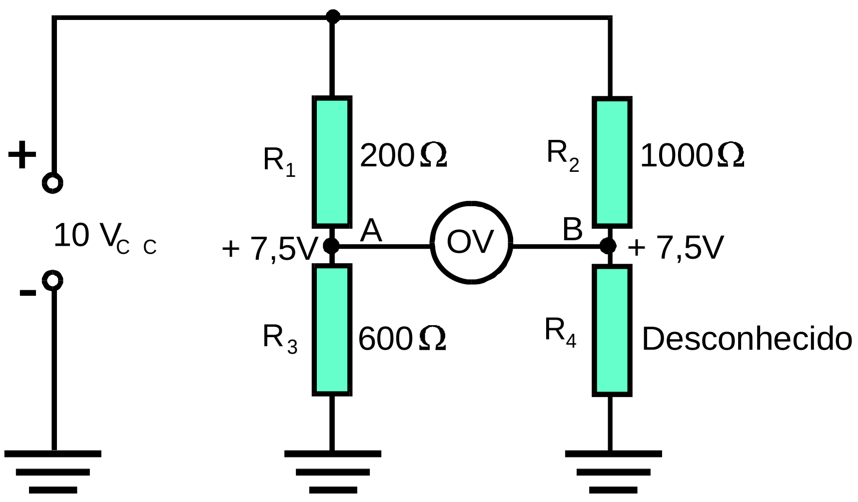


Fig.8. Circuito que ilustra o uso da **Eq.(3)**.

$$R_x = \frac{R_2 \times R_3}{R_1} = \frac{600 \times 1.000}{200} = 3.000\,\Omega$$

Através do circuito de ponte balanceada e da escolha correta dos valores dos resistores conhecidos, pode-se determinar o valor **resistivo** de qualquer componente que se necessite.

AS PONTES COMERCIAIS

O circuito de ponte balanceada apresentado tem a forma mais simples possível. Nos equipamentos comerciais destinados à medição de precisão de resistências, o princípio é aproveitado através de circuitos mais sofisticados.

A **Fig.9** apresenta um circuito de medição de resistência mais elaborado, com recursos de medição mais adequados.

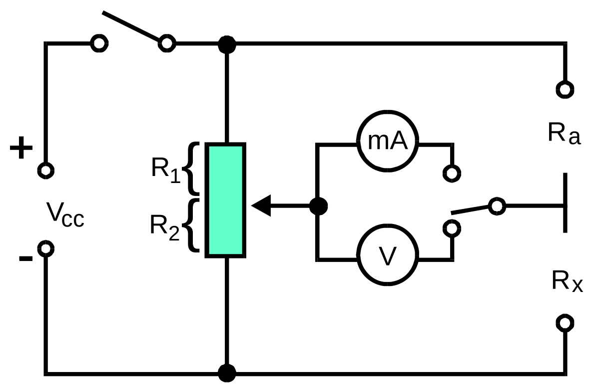


Fig.9 Exemplo de uma ponte balanceada comercial.

O circuito é utilizado da seguinte forma: o resistor desconhecido é conectado na posição R_x e na posição R_a utiliza-se um resistor conhecido (de valor tão preciso quanto possível). O circuito adquire então a configuração apresentada na **Fig.10**.

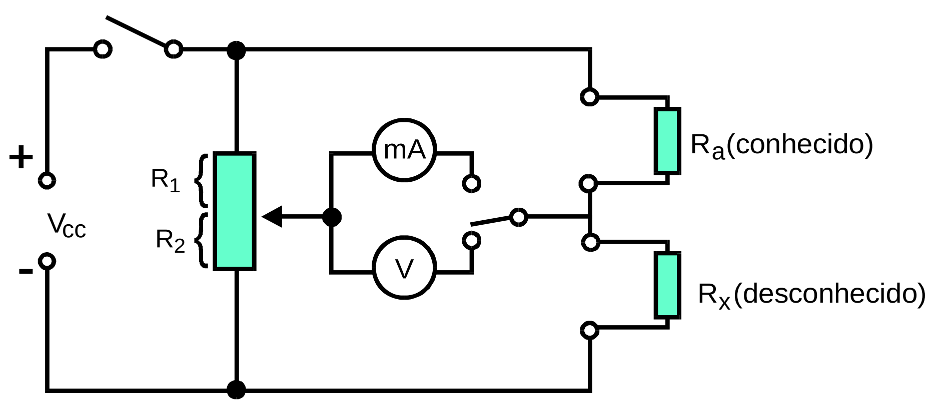


Fig.10 Exemplo de uma ponte balanceada comercial com R_a conhecida e R_x desconhecida.

O cursor do potenciômetro (que fez a função de R_1 e R_2) está acoplado a uma escala no painel do equipamento, como pode ser visto na **Fig.11**.

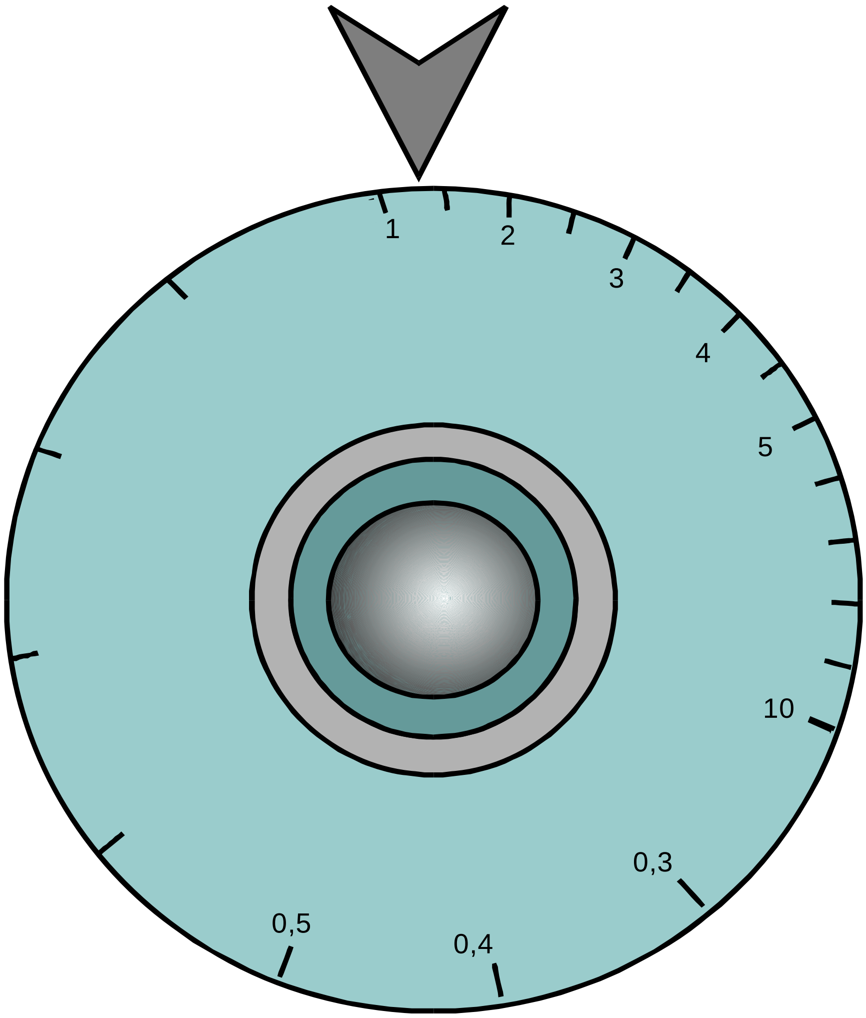


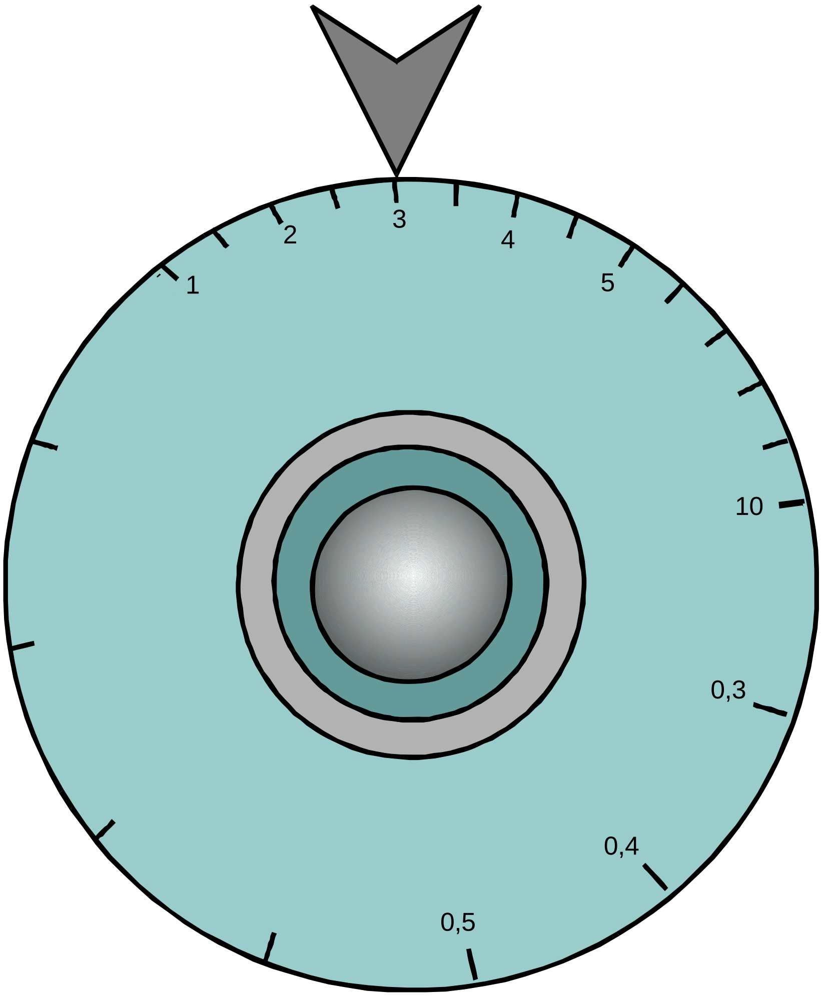
Fig.11 Escala no painel do equipamento.

Uma vez conectados os resistores, a chave de seleção do instrumento é selecionada para o voltímetro (para uma primeira medição). Quando a chave de alimentação é ligada, o voltímetro fará uma indicação de tensão.

Através do cursor do potenciômetro (que determina R_1 e R_2), procura-se um ajuste em que o voltímetro se posicione em 0V. Feito isso, a chave seletora pode ser posicionada para o miliamperímetro (mais preciso) para um ajuste final. Quando o zero no miliamperímetro for ajustado, a relação entre R_x e R_a estará apresentada no dial do potenciômetro.

<u>Exemplo 1</u>:

A partir da indicação da escala no painel do equipamento mostrado na figura abaixo, determine o valor de R_x .



<u>Solução</u> :

$$R_x = R_a \times 3$$
$$R_a = 100\Omega$$
$$R_x = 300\Omega$$

Quando não é possível obter o **zero** no voltímetro, deve-se trocar o resistor padrão R_a de forma a obter-se condição de equilíbrio da ponte.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Qual a utilidade de uma ponte balanceada ?

2. Qual o princípio de funcionamento de uma ponte balanceada ?

BIBLIOGRAFIA

SENAI/DN. **Reparador de Circuitos Eletrônicos**. Eletrônica Básica I. Rio de Janeiro. (Coleção Básica SENAI. Módulo 1).

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

No *SENAI* a Formação Profissional está voltada para a Educação permanente e a cidadania.

Introdução

Os profissionais, técnicos e estudiosos de eletrônica encontram diariamente aparelhos que não estão funcionando corretamente. Essas situações ocorrem tanto com pessoas que trabalham na área de eletrônica, como com aquelas que montam circuitos caseiros como **hobistas**. É muito importante que em situações como essas saiba-se exatamente como agir.

O conserto em um equipamento ou aparelho exige não apenas conhecimentos teóricos de eletrônica, mas também de equipamentos de teste e medição e muito raciocínio, boa vontade e principalmente perseverança. Um bom profissional de manutenção eletrônica tem que ser extremamente criterioso e organizado, executando medição e raciocínio sobre cada valor que mede. A manutenção é a situação onde teoria e prática se encontram.

Em resumo, um bom profissional de manutenção tem um modo próprio de trabalhar que garante o seu sucesso.

Este fascículo, que tratará sobre análise de defeitos em malhas resistivas, foi elaborado visando a iniciá-lo no desenvolvimento de uma sistemática de pesquisa de defeitos, apresentando uma seqüência de procedimentos que permitam ao leitor obter sucesso.

Esta será, portanto, sua primeira experiência com circuitos que **não funcionam.** Seja metódico e organizado e verá que localizar um defeito em um circuito é motivo de grande satisfação pessoal e profissional.

Para ter sucesso no desenvolvimento do conteúdo e atividades deste fascículo, o leitor deverá ter conhecimentos relativos a:

- Divisor de tensão.

Análise de defeitos por medição

A análise de defeito por medição consiste na verificação das condições de funcionamento dos componentes de um circuito através de interpretação dos valores de tensão, corrente e resistência medidos na pesquisa.

Medindo os valores reais encontrados nos circuitos e comparando com os determinados em um esquema é possível detectar a região do equipamento que não está funcionando corretamente. O desenvolvimento de um método de pesquisa é indispensável para aqueles que se dedicam à manutenção de equipamentos.

CONDIÇÕES NECESSÁRIAS

Para que seja possível executar uma análise de um circuito defeituoso por meio de medições, é necessário dispor dos valores corretos que o circuito deve apresentar quando funciona corretamente. Esses valores podem ser obtidos de duas maneiras:

- Através do esquema, onde aparecem os valores de tensão e/ou corrente nos pontos chave do circuito, como mostrado na **Fig.1**.

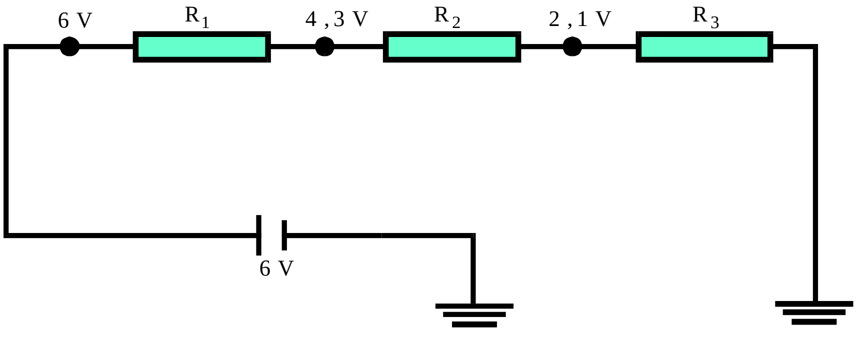


Fig.1 Esquema mostrando os valores de tensão em pontos chave.

- **Analisando propriamente o circuito e determinando as condições corretas de funcionamento.**

Para obter os valores por este método é necessário um conhecimento profundo de todos os componentes, seus princípios e condições de funcionamento para determinar a sua função no circuito. Este tipo de análise só pode ser realizado por pessoas que tenham capacidade, conhecimentos e experiência no ramo da eletrônica.

OBJETIVO DA MEDIÇÃO

As medições são realizadas para comparar os valores do circuito com os valores fornecidos no esquema.

Através de comparação, determinam-se quais os pontos onde os circuitos não estão funcionando corretamente.

As medições de corrente raramente são empregadas na pesquisa porque implicam na interrupção do circuito para colocação em série do instrumento, o que geralmente não é prático.

Uma vez que a realização de medições é feita para possibilitar uma comparação de valores, não existe objetivo prático em medir quando não se conhece, de alguma forma, os valores corretos que deveriam ser encontrados.

MÉTODO DE PESQUISA

Geralmente as características do defeito que o circuito apresenta fornecem alguma indicação do setor em que se encontra o componente danificado. Quando isto não acontece, o procedimento correto é realizar as medições do início para o fim do circuito. Este procedimento permite testar as etapas do circuito uma a uma, eliminando aquelas que funcionam corretamente, até encontrar a parte onde as medições não conferem com as do esquema.

Isto não significa que se deva medir componente por componente. Os circuitos eletrônicos têm pontos-chave que permitem verificar as suas condições de funcionamento com poucas medições. Os esquemas comerciais trazem os valores apenas nestes pontos representativos, como ilustrado na **Fig.2**.

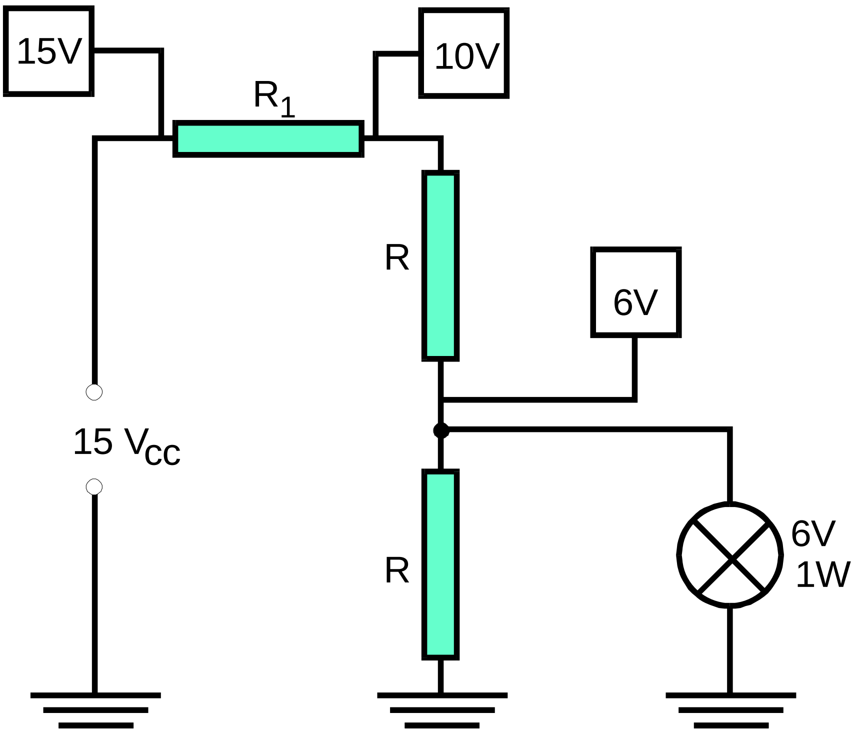


Fig.2 Tensões em pontos chaves.

Uma vez isolada a região do circuito que não está funcionando corretamente, passa-se então a uma análise individual e detalhada dos componentes que a constituem. Nesta região deve ser realizada uma medição completa, anotando-se os valores encontrados sobre o esquema. Assim será possível observar, simultaneamente, as condições de funcionamento dos componentes em teste.

Com os valores anotados, o profissional pode utilizar algumas perguntas que auxiliam a localizar o defeito, como por exemplo:

- O que pode levar a tensão neste ponto a um valor mais alto ou mais baixo?
- Quem controla a corrente neste ramal?
- O que estabelece a tensão neste ponto?
- Que defeito este componente costuma apresentar?

Estas perguntas levam ao princípio de operação do circuito, auxiliando a compreensão do seu funcionamento. É importantíssimo estabelecer as relações entre os valores medidos e os componentes que atuam sob estes valores. Somente desta maneira é possível localizar-se um elemento defeituoso dentro de um circuito.

Quando se determina através da análise, que um componente específico é a causa do mau funcionamento, deve-se retirá-lo do circuito e testá-lo individualmente. Se o componente estiver danificado, procede-se a sua substituição. O componente danificado deve ser substituído por outro de mesmas características, para que o circuito volte a funcionar corretamente.

O método de pesquisa bem desenvolvido leva o pesquisador cada vez mais próximo ao componente danificado. Para isto, cada medição é importante e deve ser interpretada apropriadamente.

A execução diária de trabalhos de manutenção propicia ao profissional um autodesenvolvimento da capacidade técnica, possibilitando inclusive a criação de um método de pesquisa próprio.

ANÁLISE DE DEFEITO EM UM CIRCUITO ELÉTRICO

A seguir, é apresentado circuito simples com um defeito que servirá para exemplificar o desenvolvimento de uma pesquisa, etapa por etapa. O diagrama elétrico desse circuito pode ser visto na **Fig.3**.

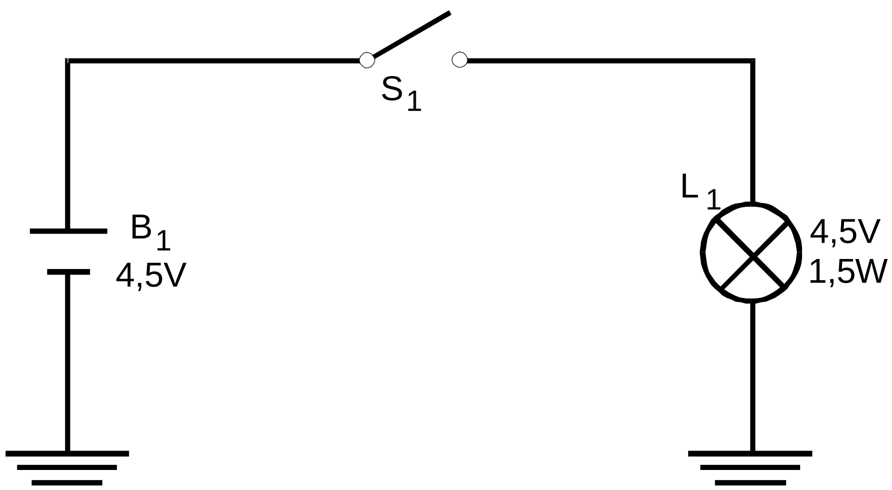


Fig.3 Lâmpada alimentada por uma tensão de 4,5V.

Segundo o esquema apresentado na **Fig.3**, quando a chave S_1 é ligada a lâmpada deve acender. Entretanto, quando S_1 é ligada a lâmpada não acende.

OBJETIVO DA PESQUISA

Localizar o componente ou ligação que impede o circuito de funcionar corretamente.

Etapas da pesquisa

Primeira etapa

Verificar com um multímetro a tensão nos pólos da bateria, como mostrado na **Fig.4**.

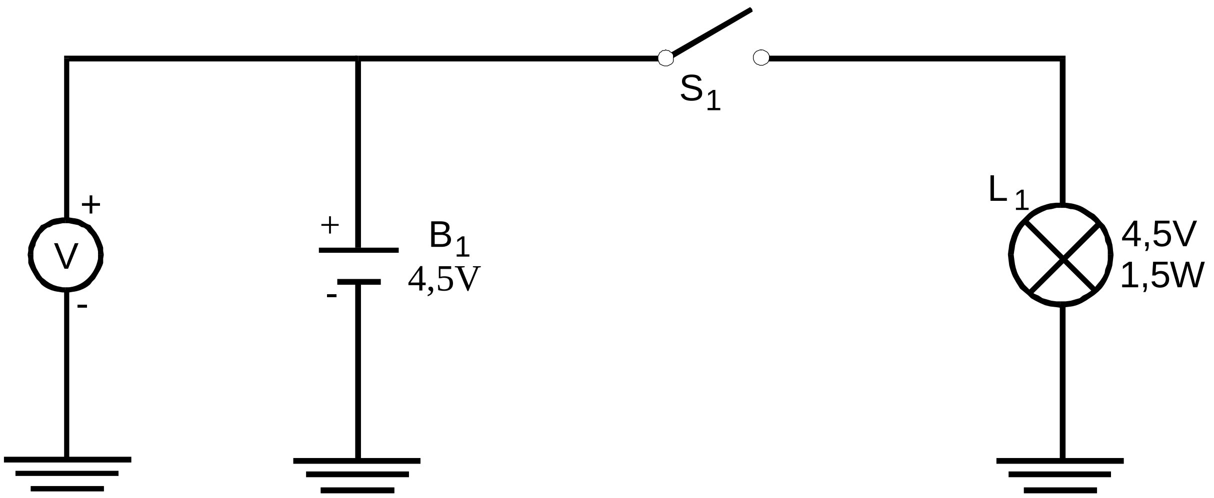


Fig.4 Teste da bateria.

Interpretação da leitura

O valor encontrado é correto, de acordo com a especificação da bateria.

Conclusão

A bateria está fornecendo a tensão correta ao circuito.

Segunda etapa

Fechar a chave e verificar se existe tensão após a chave, como indicado na **Fig.5**.

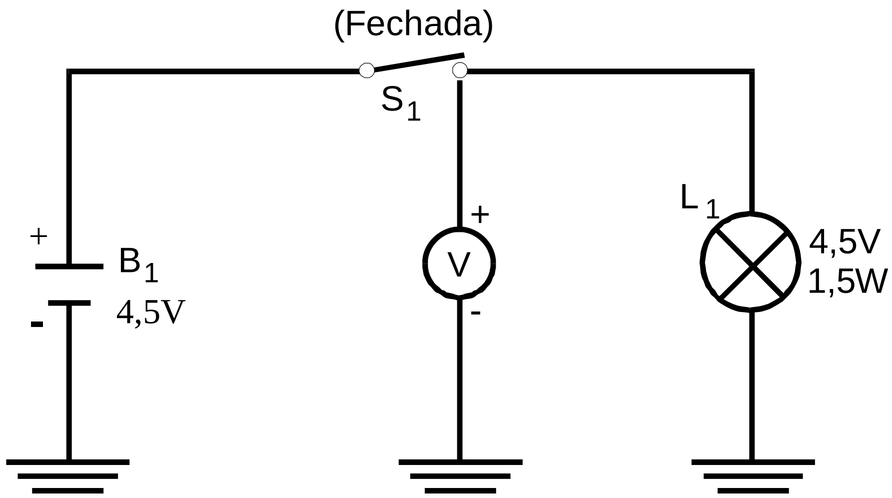


Fig.5 Medição da tensão depois da chave.

Interpretação da leitura

A tensão após a chave é a mesma tensão da bateria.

Terceira etapa

Verificar se há tensão sobre os bornes da lâmpada, conforme ilustrado na **Fig.6**.

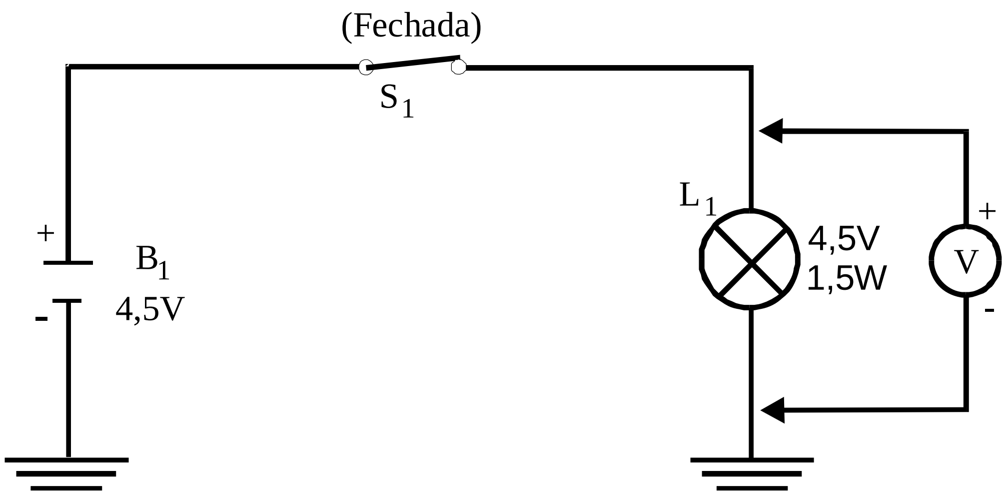


Fig.6 Medição da tensão sobre a lâmpada.

Interpretação da leitura

Não existe tensão nos terminais da lâmpada. Por isso ela não está acendendo.

Pergunta

Por que a tensão presente na chave não chega aos terminais da lâmpada?

Resposta

O condutor que interliga a chave à lâmpada pode estar rompido (aberto).

Procedimento

Verificar a continuidade do condutor com um ohmímetro.

Execução

Desligar a chave S1, porque o ohmímetro não pode ser utilizado em circuitos energizados e testar a continuidade com o ohmímetro, como mostrado na **Fig.7**.

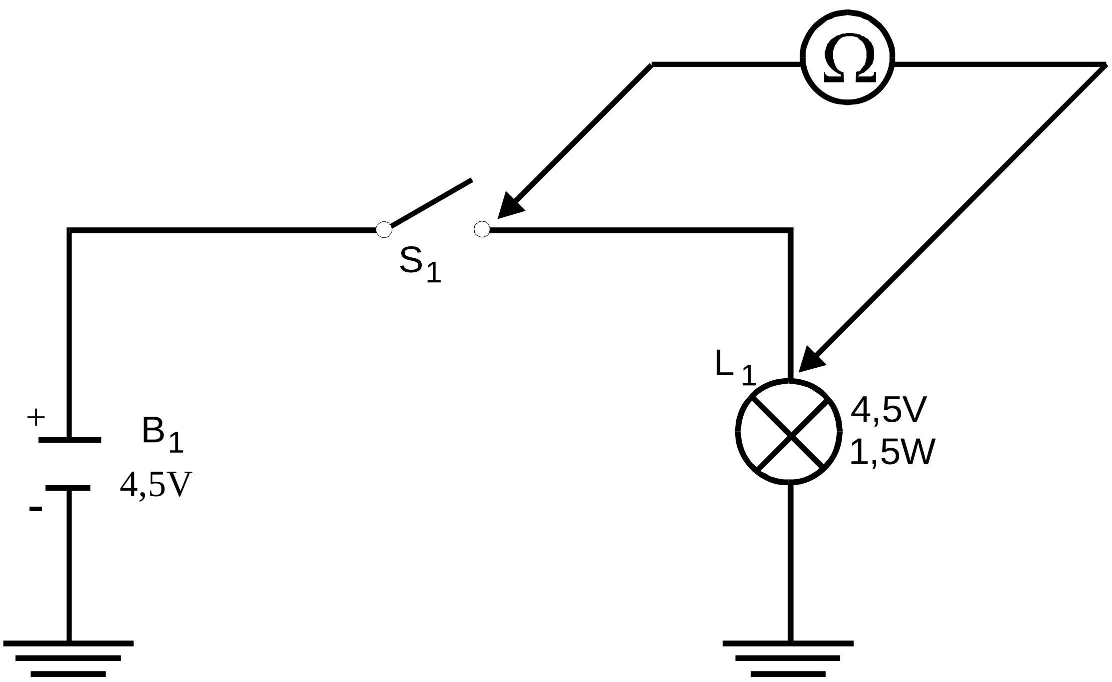


Fig.7 Teste de continuidade.

O ohmímetro deve indicar 0Ω porque se o condutor está bom as pontas de prova ficam em curto. Ao realizar a leitura do ohmímetro, verifica-se que este indica altíssima resistência o que significa que existe uma interrupção entre a chave e a lâmpada, como indicado na **Fig.8**.

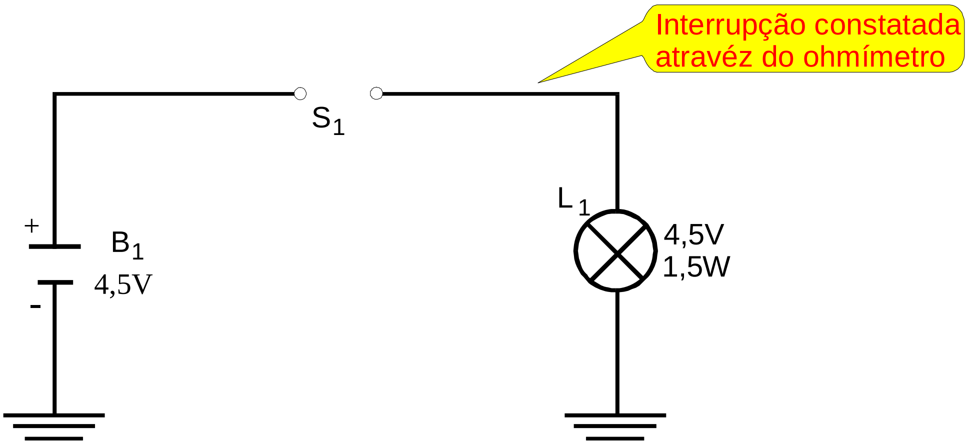


Fig.8 Indicação de descontinuidade no condutor entre a chave e a lâmpada.

Procedimento

Refazer a ligação entre chave e lâmpada com outro condutor. Este é um exemplo de correção de defeito por pesquisa. Supondo-se que após a substituição do condutor e após ligar-se a chave S_1 a lâmpada continue apagada, deve-se continuar a pesquisa.

Quarta etapa

Verificar novamente a tensão nos bornes da lâmpada, como ilustrado na **Fig.9**.

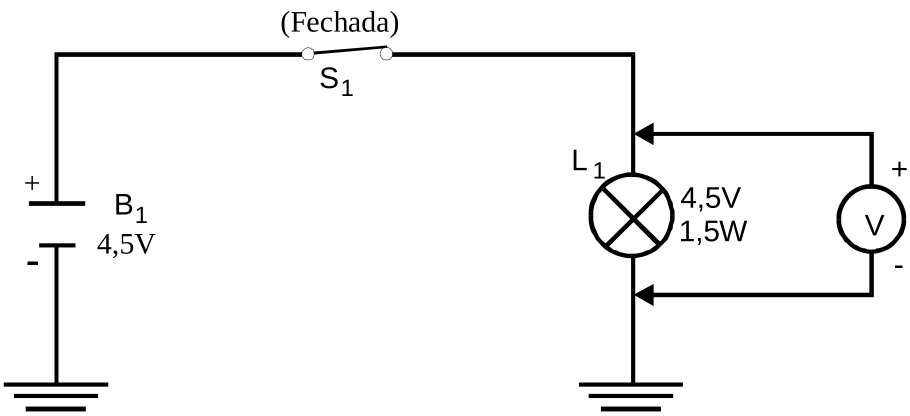


Fig.9 Medição da tensão nos bornes da lâmpada.

Interpretação da leitura

A tensão presente nos bornes da lâmpada é correta.

Pergunta

Por que a lâmpada não acende se a tensão nos seus bornes é correta?

Resposta

A lâmpada pode estar danificada, com seu filamento rompido.

Procedimento

Testar a continuidade do filamento com o ohmímetro.

Execução

Retirar a lâmpada do circuito e testá-la com o ohmímetro, como mostrado na **Fig.10**.

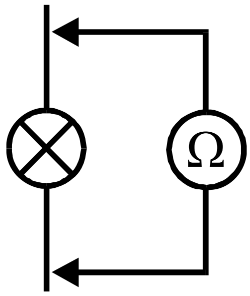


Fig.10 Teste da lâmpada com o ohmímetro.

Caso o filamento esteja realmente rompido, o ponteiro do ohmímetro não se deslocará sobre a escala.

Procedimento

Substituir a lâmpada por outra de mesma característica (4,5V-1,5W) previamente testada.

ANÁLISE DE UM DEFEITO EM UM DIVISOR DE TENSÃO

A seguir, é apresentado um divisor de tensão com defeito que será analisado para exemplificar novamente o desenvolvimento da pesquisa.

Segundo o esquema apresentado na **Fig.11**, o divisor de tensão reduz uma tensão de alimentação de 15V (na entrada) para 6V (na saída) que serve para operar o relé (RL). A ligação da chave S_1 deve provocar a operação do relé instantaneamente. Entretanto, quando a chave S_1 é ligada, o relé (RL) não opera.

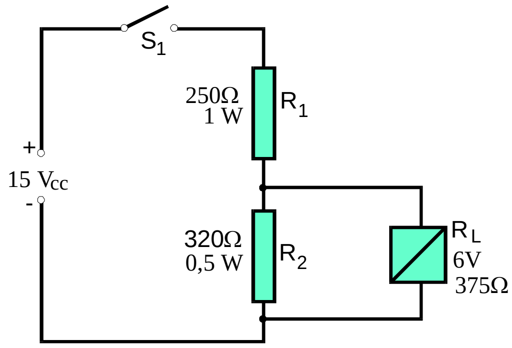


Fig.11 Divisor de tensão.

OBJETIVO DA PESQUISA

Localizar o componente ou ligação que impede o circuito de funcionar corretamente.

Etapas da pesquisa

Primeira etapa

Verificar com um voltímetro se os terminais de entrada do circuito recebem a tensão de alimentação, conforme ilustrado na **Fig.12**.

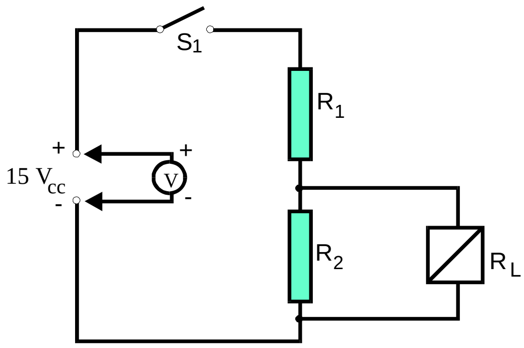


Fig.12 Verificação da tensão de alimentação.

Interpretação da leitura

O valor encontrado é um pouco menor que o indicado no esquema.

Observação

A diferença encontrada pode ser provocada pelo percentual do erro do instrumento ou por erro da leitura.

Conclusão

A tensão na entrada do circuito está correta.

Segunda etapa

Fechar a chave e verificar se há tensão nos extremos do divisor (pontos A, B), conforme ilustrado na **Fig.13**.

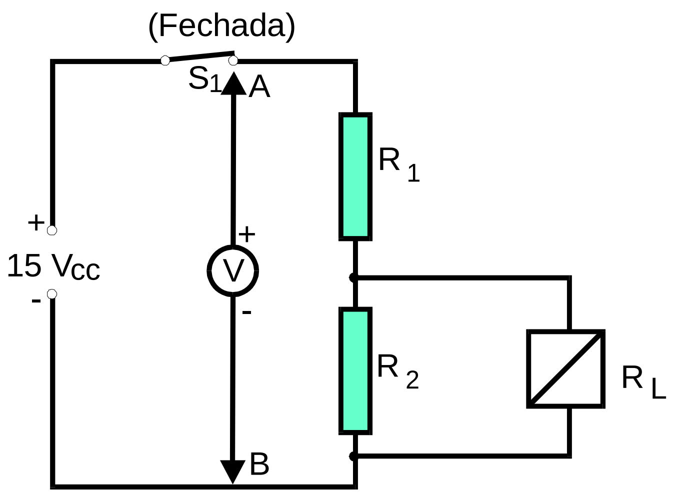


Fig.13 Verificação se há tensão nos extremos do divisor.

Interpretação da leitura

Não há tensão após a chave. A chave deve estar defeituosa.

Pergunta

Por que não há tensão na saída da chave se ela está ligada?

Resposta

A chave pode estar defeituosa, não realizando a conexão elétrica dos terminais quando é colocada na posição ligada.

Procedimentos

Desconectar a chave do circuito e testá-la isoladamente com um ohmímetro.

Execução

Colocar a chave na posição ligada e conectar as ponteiras do ohmímetro sobre os seus terminais, conforme mostrado na **Fig.14**.

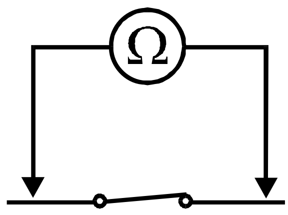


Fig.14 Teste da chave.

O ohmímetro deve indicar 0. No entanto, isto não acontece.

Conclusão

A chave está com defeito.

Procedimento

Substituir a chave por outra, previamente testada.

Para que o exercício proposto de pesquisa de defeitos possa prosseguir, admita que a chave não é o único componente danificado.

Com a substituição da chave, a **segunda etapa** toma a nova configuração apresentada na **Fig.15**.

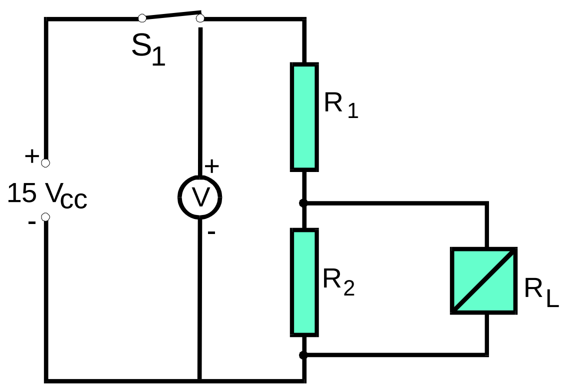


Fig.15 Nova configuração do circuito da **Fig.11**.

Interpretação da leitura

A tensão após a chave está correta.

Conclusão

A chave está funcionando corretamente.

Terceira etapa

Verificar a tensão sobre os terminais da carga, como ilustrado na **Fig.16**.

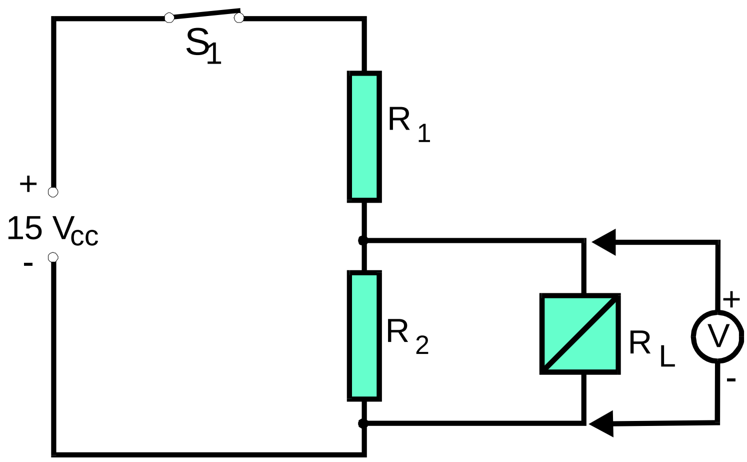


Fig.16 Verificação da tensão sobre a carga.

Interpretação da leitura

Não há tensão na saída do divisor.

Pergunta

Que causas podem levar a tensão de saída do divisor a 0?

Resposta

Um curto nos terminais de saída. Resistor R_1 aberto.

Procedimento

Medir a resistência entre os dois bornes de saída do divisor com a chave S_1 desligada.

Execução

Conectar o ohmímetro diretamente aos dois bornes de saída do divisor (com a alimentação desligada). O ohmímetro não deve indicar resistência 0, que significa um curto circuito entre os terminais, como pode ser visto na **Fig.17**.

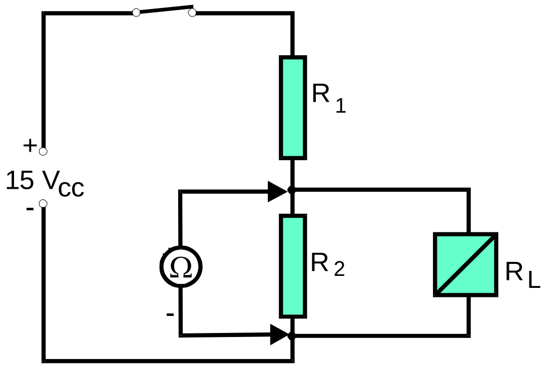


Fig.17 Conexão do ohmímetro na saída do divisor.

A indicação do ohmímetro deverá ser o valor de resistência existente entre dois bornes. Este valor é resultante da associação paralela do relé com R_2.

$$R_{eq} = \frac{R_2 \times R_{RELÉ}}{R_2 + R_{RELÉ}} = \frac{250 \times 375}{320 + 375} = 172{,}6\,\Omega$$

Interpretação da leitura

A resistência entre os bornes de saída está correta.

Conclusões

(1) não há curto-circuito nos terminais de saída do divisor e (2) o resistor R_2 e o relé não estão danificados.

A segunda conclusão resulta da análise da resistência encontrada no ohmímetro, comparada com o valor determinado no cálculo do paralelo R_2 com o relé. Se o R_2 ou o relé estivessem com o valor muito alterado (além da tolerância), o valor lido com o ohmímetro, seria bastante diferente do calculado. Por exemplo, valor calculado 17Ω e valor lido 90Ω.

Pergunta

Que outro componente pode impedir a existência de tensão na saída do divisor ?

Resposta

O resistor R_1 se estiver aberto (interrompido).

Procedimento

Desconectar R_1 do circuito e medir a sua resistência, conforme ilustrado na **Fig.18**.

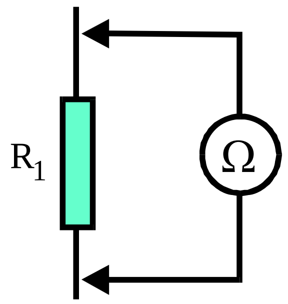


Fig.18 Medição da resistência R_1.

O ohmímetro deve indicar o valor normal da resistência (250Ω) admitindo-se a tolerância.

Na medição realizada, o ponteiro não se movimentou em nenhuma escala. Resistência infinita.

Interpretação da leitura

O resistor não permite a passagem da corrente elétrica.

Conclusão

O resistor está aberto.

Procedimento

Substituir o resistor danificado por outro de igual valor e potência de dissipação (250Ω 1W) previamente testado.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Quais as condições necessárias para se corrigirem defeitos em circuitos elétricos ?

BIBLIOGRAFIA

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

A harmonia da atividade industrial com o meio ambiente é um dos objetivos do *SENAI*.

Introdução

Utilizar energia elétrica em nossas residências é um fato costumeiro. Na verdade, estamos tão acostumados a usufruir dos benefícios da eletricidade que só percebemos a sua importância quando ocorre uma interrupção no seu fornecimento.

Para um usuário comum, não existe a necessidade do conhecimento de que tipo de energia existe à disposição nas residências. Entretanto, para aqueles que se propõem a prestar serviços de manutenção de equipamentos, sejam elétricos ou eletrônicos, que são alimentados a partir da rede de fornecimento é extremamente importante conhecer as características da energia elétrica domiciliar.

Para isso foi elaborado este fascículo que tratará das tensões elétricas alternadas dando especial atenção ao tipo disponível nas redes elétricas. O objetivo do fascículo é fazer com que o leitor conheça as características e a forma de medição das tensões alternadas.

Lembre-se que, sem conhecer a forma da energia que alimenta um equipamento, dificilmente se têm condições de fazer sua manutenção.

Para ter sucesso no desenvolvimento do conteúdo e atividades deste fascículo, o leitor deverá ter conhecimentos relativos a:

- Tensão elétrica.
- Corrente elétrica.
- Potência elétrica em CC.

Tensão alternada

A tensão alternada, denominada normalmente de tensão CA, difere da tensão contínua porque troca de polaridade constantemente, provocando nos circuitos um fluxo de corrente ora em um sentido, ora em outro, como ilustrado na **Fig.1**.

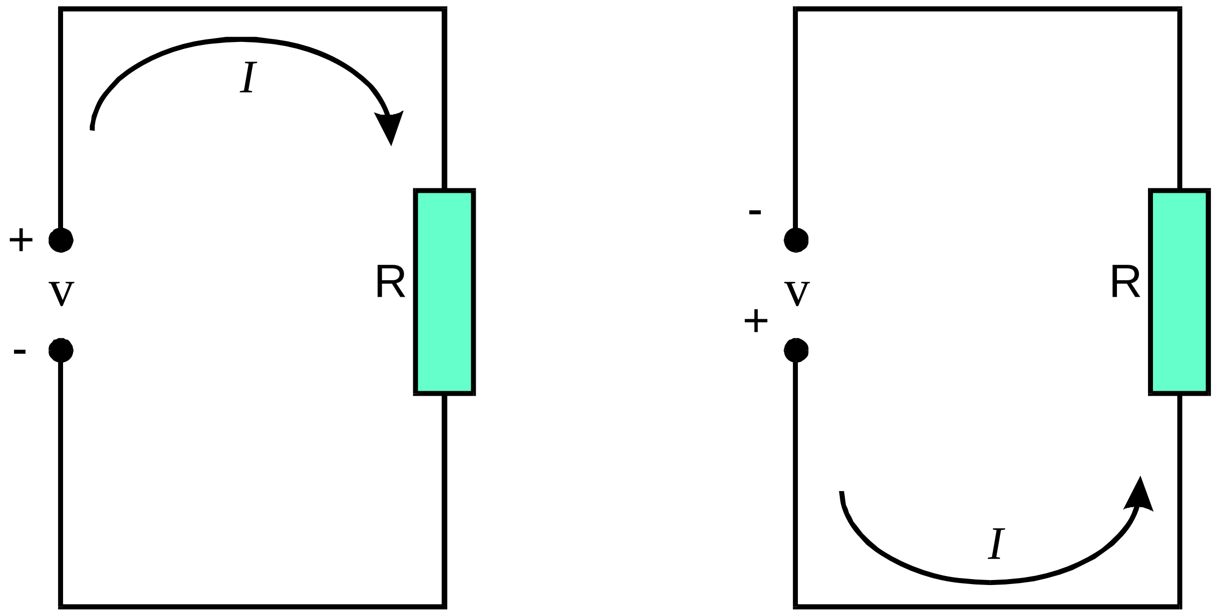


Fig.1 Inversão do sentido da corrente.

A tensão elétrica disponível nas residências é do tipo alternada, razão pela qual a maior parte dos equipamentos elétricos é construída para funcionar alimentada a partir deste tipo de corrente elétrica.

CARACTERÍSTICAS DA TENSÃO ALTERNADA

A condição fundamental para que uma determinada tensão elétrica seja considerada como tensão alternada é que a sua polaridade não seja constante.

Os diversos tipos de tensão CA podem ser distinguidos através de 4 (quatro) características:

- Forma de onda.
- Ciclo.
- Período.
- Freqüência.

FORMA DE ONDA

Existem tensões alternadas com diversas formas de onda. Na **Fig.2** são apresentados os gráficos de alguns tipos de tensão alternada.

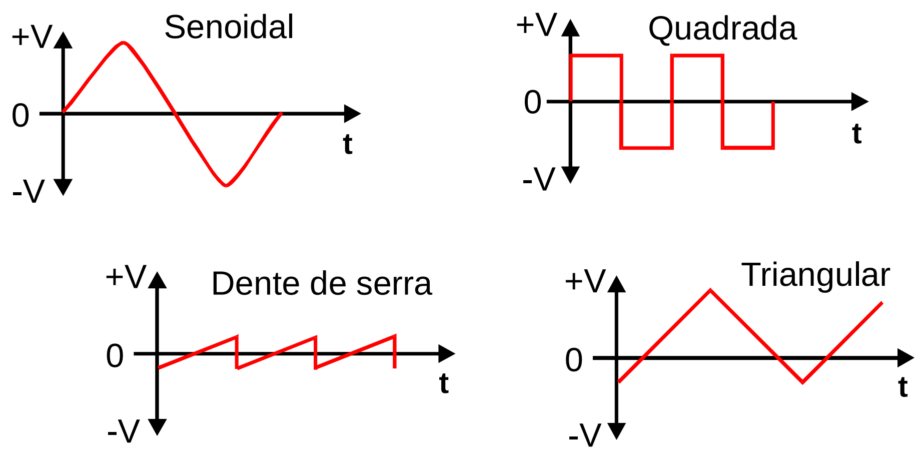


Fig.2 Algumas formas de tensão alternada.

CICLO

É uma variação completa da forma de onda. O ciclo é, em resumo, a parte da forma de onda que se repete sucessivamente, como mostrado na **Fig.3**

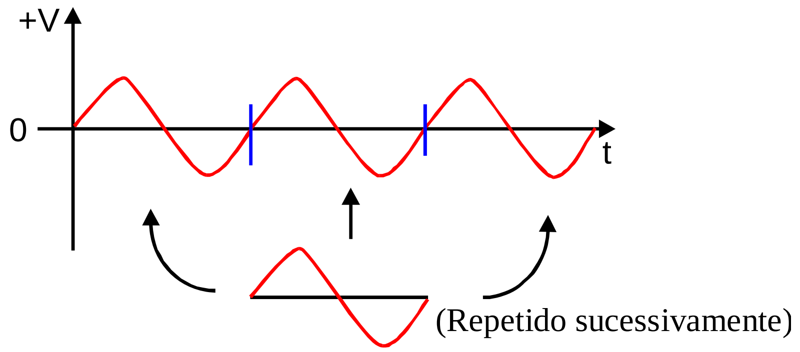


Fig.3 Ciclo de uma onda senoidal.

A **Fig.4** mostra dois tipos de forma de onda alternada com um ciclo completo indicado.



Fig.4 Ciclos de duas formas de onda diferentes.

Quando se faz necessário um estudo mais detalhado de cada uma das regiões do gráfico (acima do eixo ou abaixo do eixo), utiliza-se a expressão semi-ciclo para identificar a metade de um ciclo completo (entre dois pontos **zero**).

Um semiciclo pode ser identificado como positivo (acima do eixo) e negativo (abaixo do eixo).

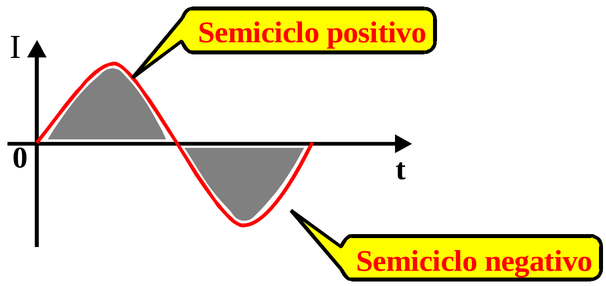


Fig.5 Semiciclos positivo e negativo.

PERÍODO

Período é a designação empregada para definir o tempo necessário para que se realize um ciclo completo de uma corrente alternada.

O período é representado pela notação T e sua unidade é medida em segundos (s).

Como os períodos das correntes alternadas são normalmente menores que 1s, utilizam-se normalmente os submúltiplos da unidade, indicados na **Tabela.1**.

Tabela.1. Submútiplos do segundo

Milissegundos	ms	1/1.000 s ou 10^{-3}s
Microssegundos	μs	1/1.000.000 s ou 10^{-6}s

A **Fig.6** mostra três sinais alternados com períodos indicados.

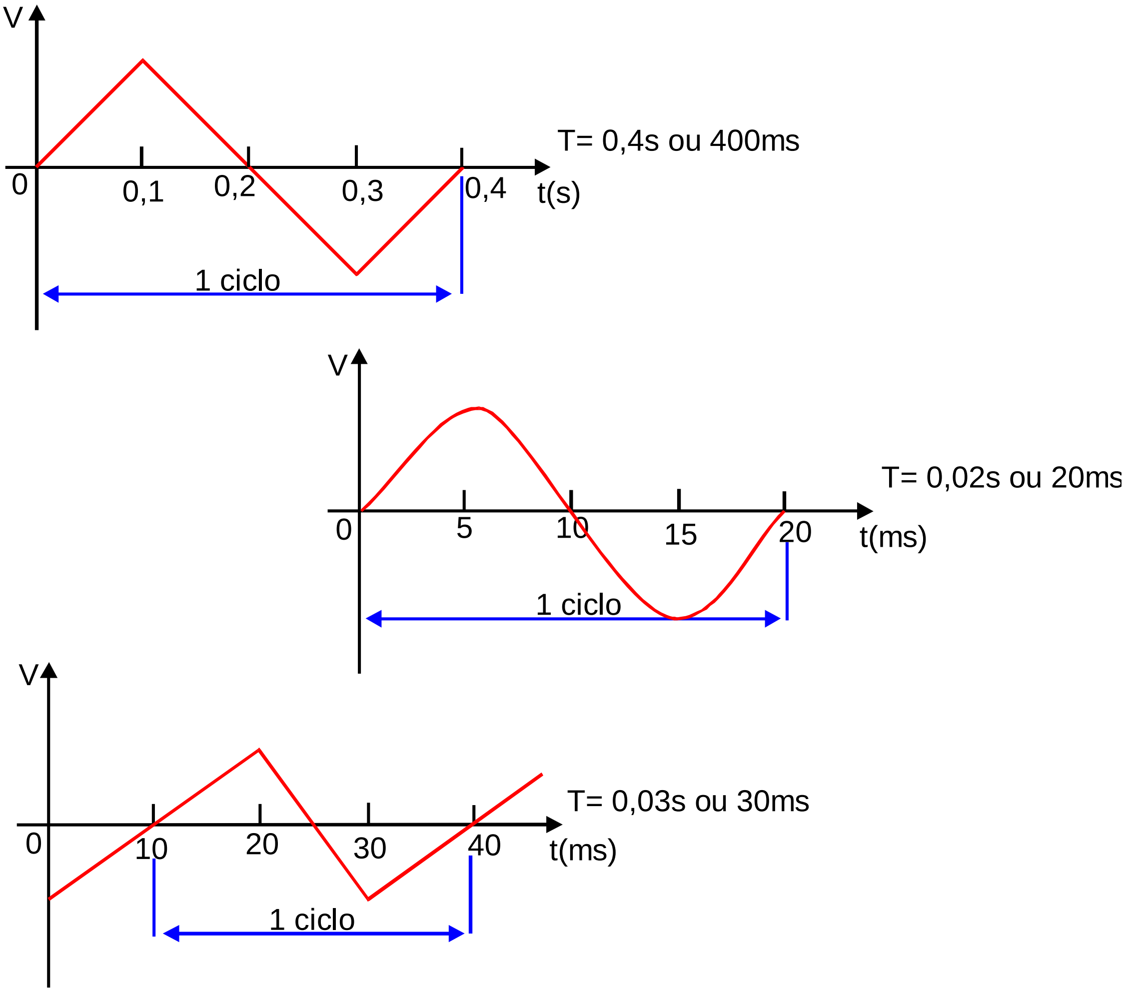


Fig.6 Três diferentes formas de sinais alternados e seus respectivos períodos.

FREQÜÊNCIA

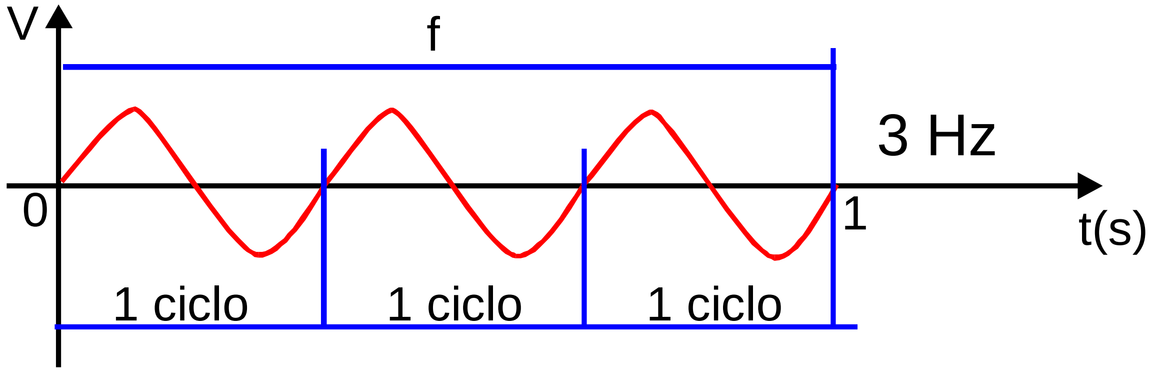
A freqüência é o número de ciclos de uma corrente alternada que ocorrem em 1s. É indicada pela letra f e sua unidade é o hertz (Hz).

São muito utilizados os múltiplos da unidade de freqüência, mostrados na **Tabela.2**.

Tabela.2 Múltiplos do Hertz

Quilohertz	KHz	1.000Hz ou 10^3Hz
Megahertz	MHz	1.000.000Hz ou 10^6 Hz

A **Fig.7** mostra dois exemplos de tensão alternada com as respectivas freqüências.



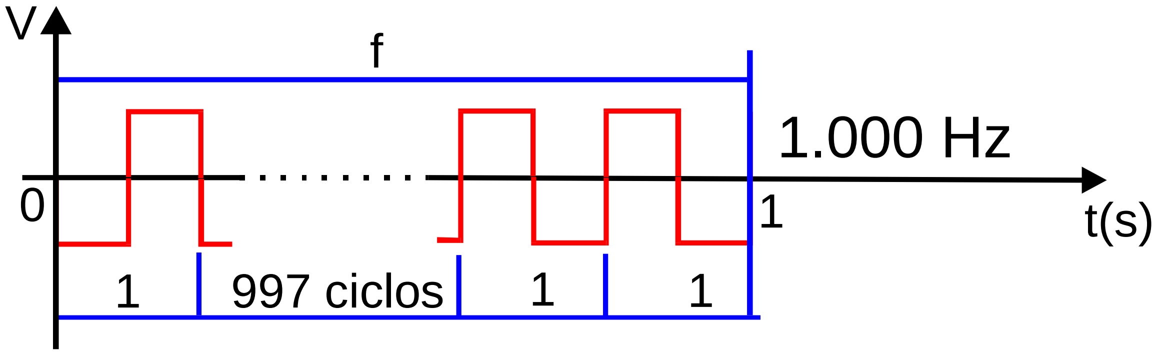


Fig.7 Freqüências de duas tensões alternadas.

RELAÇÃO ENTRE PERÍODO E FREQÜÊNCIA

Existe uma relação matemática entre período e freqüência de uma corrente alternada. Quanto menor o período (menor o tempo de duração de um ciclo), maior o número de ciclos realizados em 1s ou seja, freqüência e período são inversamente proporcionais.

Expressando matematicamente a relação de proporcionalidade inversa, tem-se:

$$F = 1/T \quad \text{ou} \quad T = 1/f \qquad (1)$$

onde f é a frequência em hertz e T o período em segundos.

A **Eq.(1)** permite determinar a freqüência de uma corrente alternada se seu período é conhecido e vice-versa.

Tensão alternada senoidal

A tensão alternada senoidal é a mais importante das tensões CA, tendo em vista que toda a distribuição de energia elétrica para os consumidores (residenciais, industriais, comerciais etc.) é feita através deste tipo de corrente alternada. Isto significa que todos os aparelhos ligados à rede elétrica são alimentados por corrente alternada senoidal.

VALORES DE PICO DA TENSÃO ALTERNADA SENOIDAL

Analisando-se um ciclo completo da tensão alternada senoidal, verifica-se que o valor instantâneo da tensão está em modificação, como ilustrado na **Fig.8**.

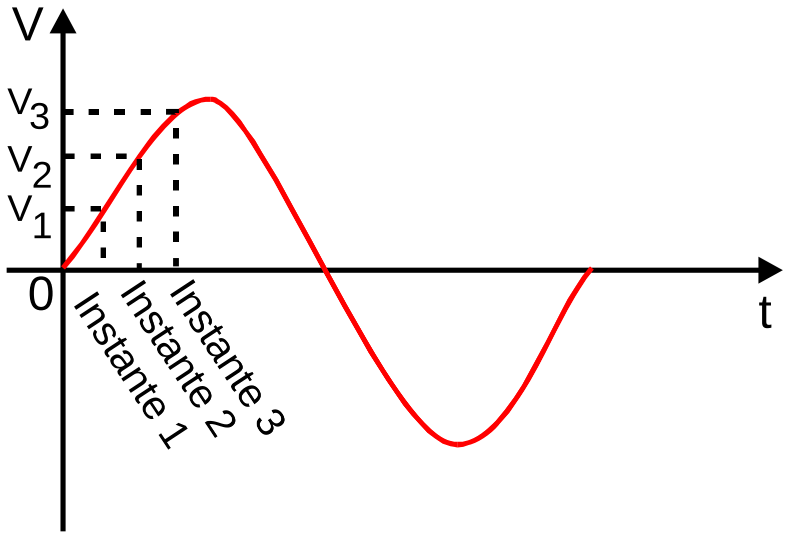


Fig.8 Valores instantâneos de uma tensão alternada.

O valor máximo de tensão que a CA atinge em cada semiciclo é denominado de tensão de pico, indicada pela notação V_p, como pode ser visto na **Fig.9**.

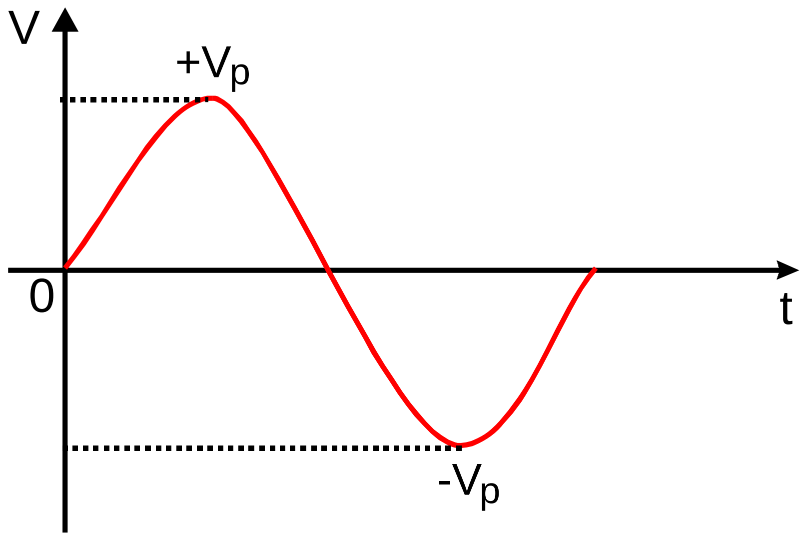


Fig.9 Tensão de pico.

O valor de pico negativo é numericamente igual ao valor de pico positivo, de forma que a determinação do valor pode ser feita em qualquer um dos semiciclos. A **Fig.10** mostra uma tensão senoidal com tensão de pico de 180V.

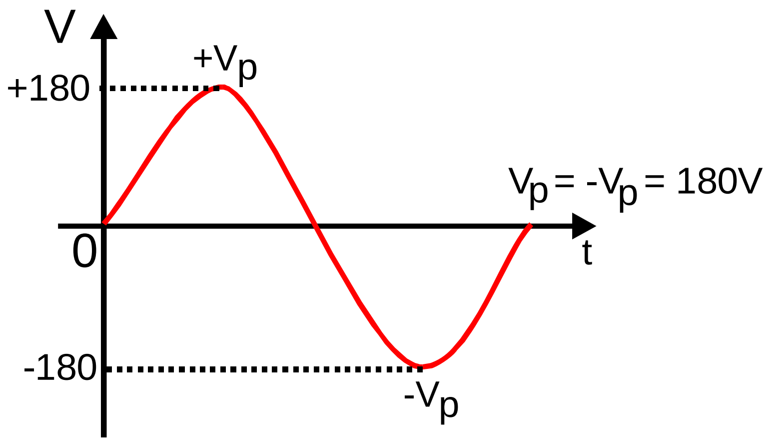


Fig.10 Tensão de pico de 180V.

VALOR DA TENSÃO DE PICO A PICO DA CA SENOIDAL

A tensão de pico a pico (V_{pp}) de uma CA senoidal é medida entre os dois picos máximos (positivo e negativo) de um ciclo, como mostrado na **Fig.11**.

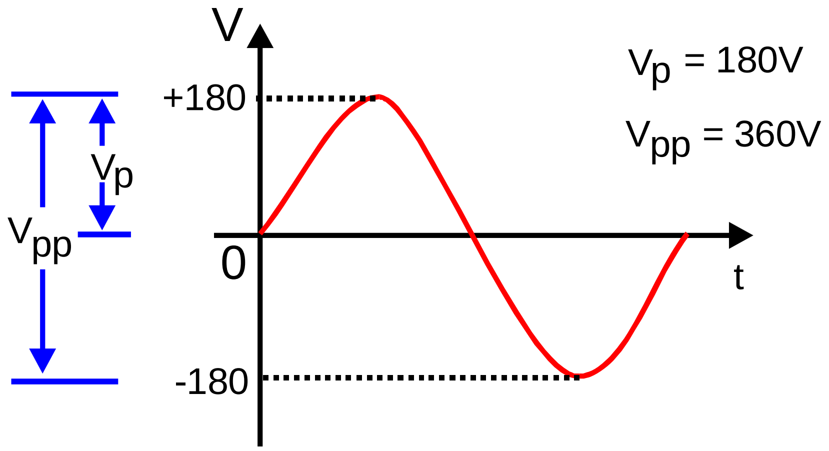


Fig.11 Tensão de pico a pico.

Considerando-se que os dois semiciclos da CA são iguais, pode-se afirmar que a relação entre a tensão de pico e a tensão de pico a pico é:

$$V_{pp} = 2V_p$$

Da mesma forma que as medições de pico e de pico a pico se aplicam à tensão alternada senoidal, estas medições aplicam-se também à corrente alternada senoidal, como mostrado na **Fig.12**.

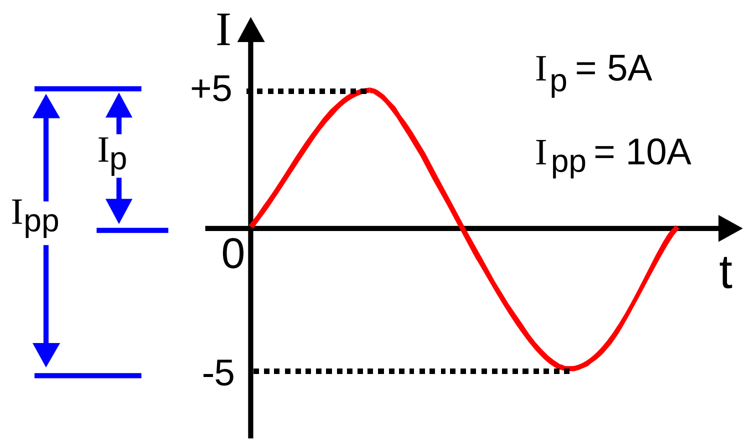


Fig.12 Corrente de pico e de pico a pico de uma onda senoidal.

CORRESPONDÊNCIA ENTRE CA E CC

Quando se aplica uma tensão contínua sobre um resistor, verifica-se a circulação de uma corrente de valor constante, como ilustrado na **Fig.13**.

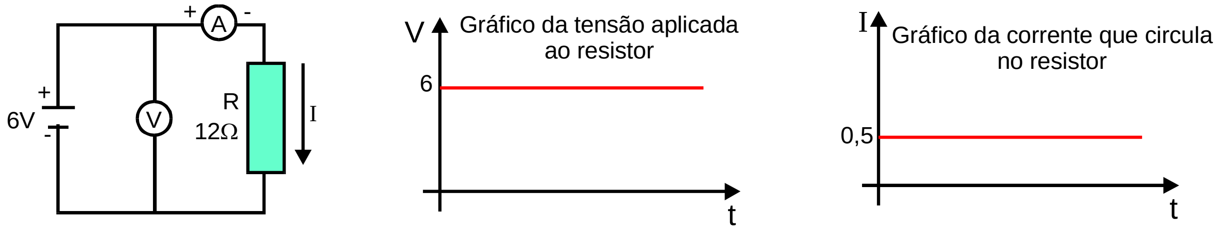


Fig.13 Comportamento da tensão e da corrente em uma carga alimentada por uma tensão contínua.

Como efeito resultante, estabelece-se uma dissipação de potência no resistor (P = V.I). Esta potência é dissipada em regime contínuo, fazendo com que haja um desprendimento de calor constante no resistor, como ilustra **a Fig.14**.

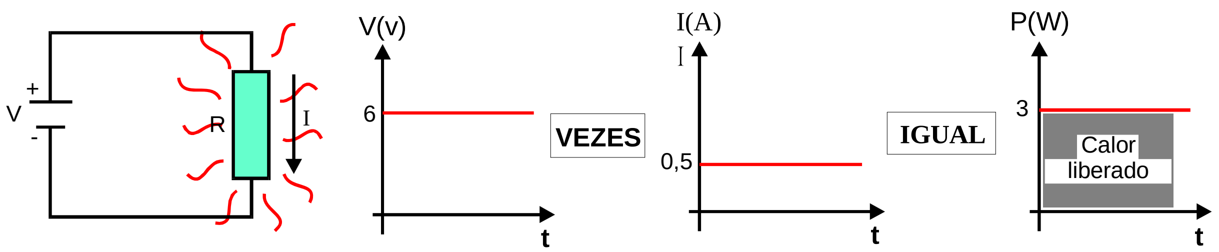


Fig.14 Dissipação de calor em um resistor alimentado por uma tensão contínua.

Aplicando-se uma tensão alternada senoidal a um resistor, estabelece-se a circulação de uma corrente alternada senoidal.

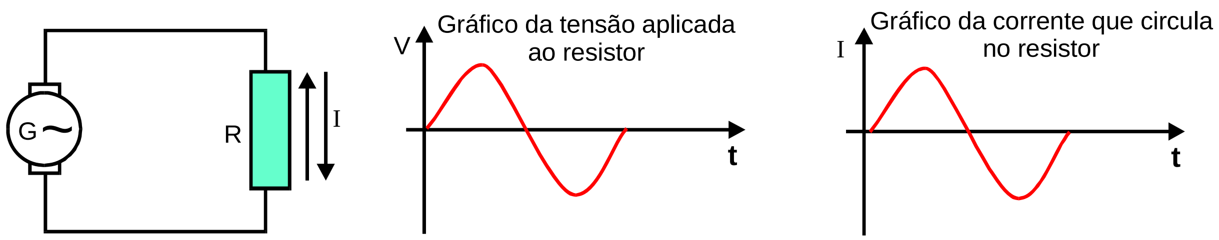


Fig.15 Corrente alternada senoidal através de uma carga alimentada por uma tensão alternada senoidal.

Como a tensão e a corrente são variáveis, a quantidade de calor produzida no resistor varia a cada instante.

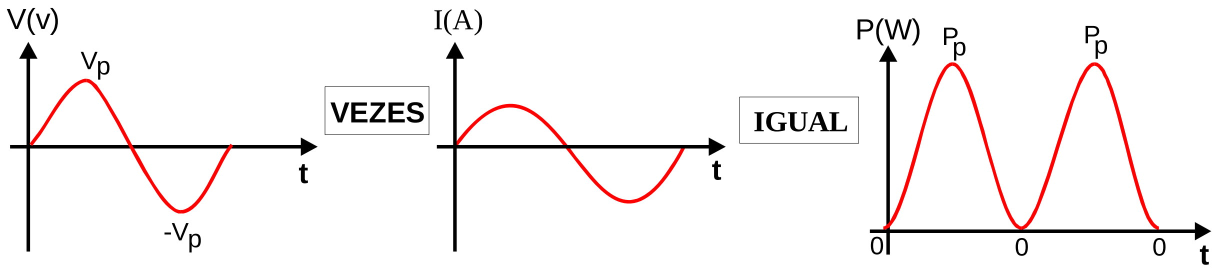


Fig.16 Dissipação variável de calor em um resistor alimentado por uma tensão alternada.

Nos momentos em que a tensão é zero, não há corrente e também não há produção de calor. Nos momentos em que a tensão atinge o valor máximo (V_p), a corrente também atinge o valor máximo (I_p) e a potência dissipada é máxima. Deste modo, um resistor de valor R ligado a uma tensão contínua de 10V produz mais calor que o mesmo resistor R ligado a uma tensão alternada de 10V de pico, como pode ser visto na **Fig. 17.**

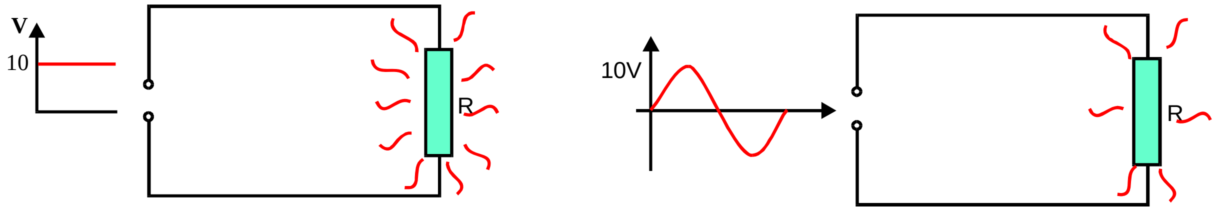


Fig. 17 Relação entre dissipação de calor e forma da tensão.

Para obter no resistor R em CA a mesma quantidade de calor, no mesmo tempo, necessita-se uma tensão alternada de 14,1V de pico, como mostrado na **Fig. 18.**

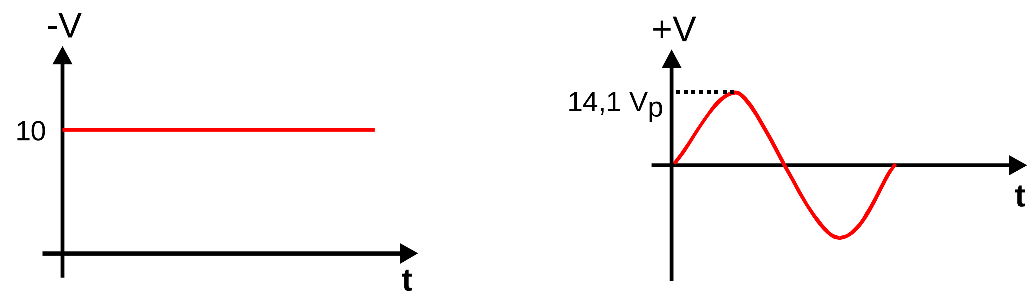


Fig.18 Comparação dos efeitos de uma tensão CC de 10V e uma CA de 14,1V de pico.

Isso significa que uma tensão alternada de 14,1V de pico é tão “eficaz” quanto uma tensão contínua de 10V na produção de trabalho. Por essa razão, diz-se que uma tensão CA de $14{,}1V_p$ corresponde a uma tensão eficaz de 10V.

$$14{,}1V_p = 10V_{ef} \qquad V_{ef} = \text{Volts eficazes}$$

Tensão eficaz (ou corrente eficaz) de uma CA senoidal é um valor que indica a que tensão contínua (ou corrente contínua) esta CA corresponde, em termos de produção de trabalho.

Existe uma relação constante entre o valor eficaz de uma CA senoidal e seu valor de pico. Esta relação é:

$$V_{ef} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \qquad (2)$$

$$I_{ef} = \frac{I_p}{\sqrt{2}} \qquad (3)$$

Aplicando-se a equação da tensão eficaz à tensão alternada senoidal de 14,14 V de pico verifica-se a correção da equação :

$$V_{ef} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} = \frac{14{,}1}{1{,}41} = 10\ \text{V}$$

As equações da corrente eficaz e da tensão eficaz podem ser encontradas através de processos empregando cálculo integral.

Os instrumentos utilizados para medição em circuitos de corrente alternada sempre indicam valores eficazes (de corrente e tensão).

Exemplo 1:

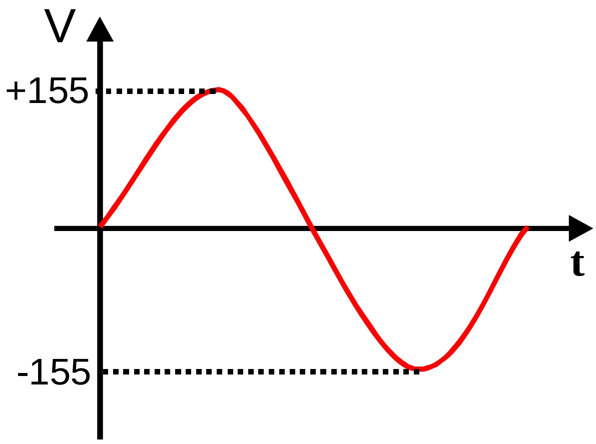
Um voltímetro conectado a um circuito de CA indica uma tensão eficaz de 110V. Determinar a tensão de pico que originou 110V eficazes.

Solução

$$V_{ef} = \frac{V_p}{\sqrt{2}}$$

$$V_p = V_{ef} \times \sqrt{2} = 110 \times 1{,}41$$

$$V_p = 155\ V$$



Varivolt

O varivolt é um equipamento que recebe uma tensão alternada fixa (110V, 220V, 380V) a partir da rede elétrica e fornece um valor de tensão alternada ajustável na saída. A **Fig.19** mostra um varivolt típico.

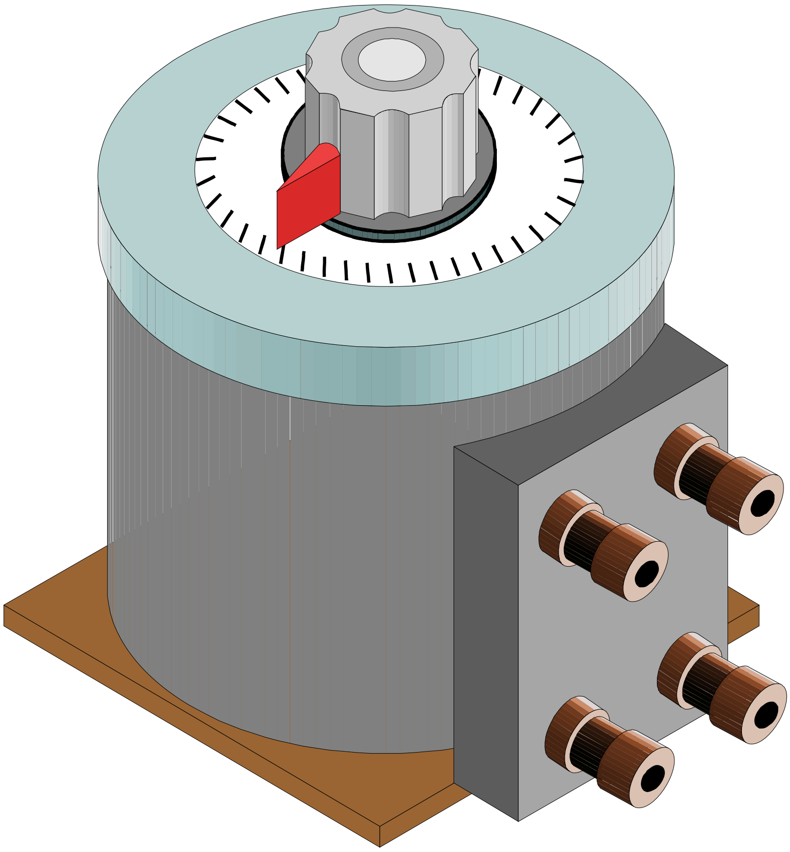


Fig.19 Varivolt típico.

O varivolt é muito utilizado em teste e manutenção de equipamentos e também para a realização de experiências com componentes e circuitos eletrônicos.

UTILIZAÇÃO DE VARIVOLTS

A **Fig.**20 mostra a placa do varivolt com quatro bornes, dos quais dois se destinam à entrada e dois à saída de tensão CA.

Fig.20 Placa de bornes em um varivolt típico.

Os bornes de entrada servem para alimentação do varivolt a partir da rede elétrica. Utiliza-se um cabo para conectar os bornes de entrada à tomada, como mostrado na **Fig.21**

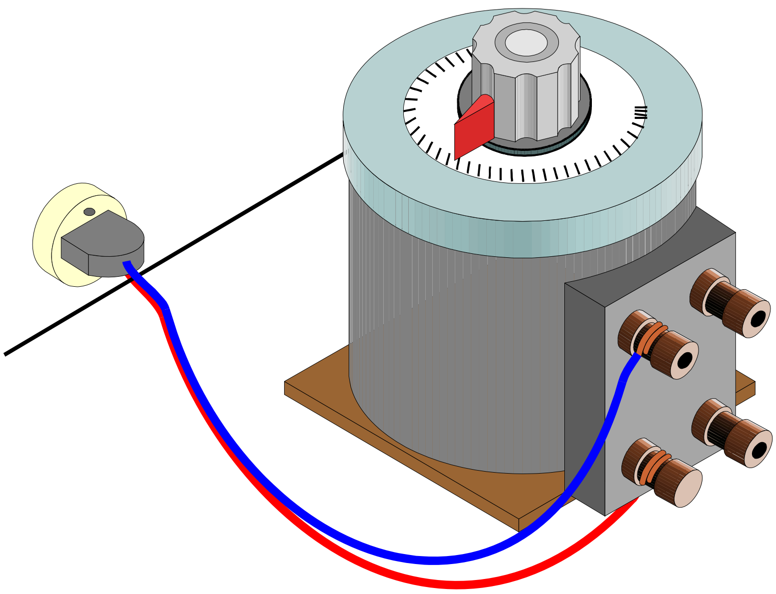


Fig.21 Varivolt ligado à tomada.

Antes de realizar a alimentação, deve-se verificar:

- Se a tensão da rede confere com a tensão nominal do varivolt.
- Se não existe curto-circuito entre os terminais de entrada ou de saída do varivolt.
- Se o cabo for fixado com firmeza nos bornes.

O cabo de alimentação deve ser ligado primeiro aos bornes de entrada do varivolt e depois à tomada, para evitar choques elétricos e curtos-circuitos.

Os bornes de saída fornecem a tensão CA necessária. A tensão nestes bornes é ajustada através do cursor, na parte superior do varivolt, conforme ilustrado na **Fig.22**.

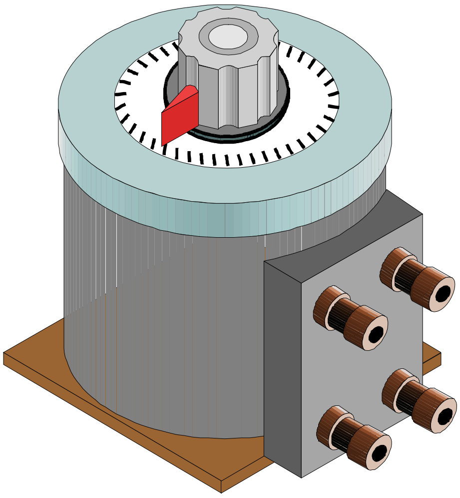


Fig.22 Indicação de tensão pela parte superior do varivolt.

O ajuste pode ser feito também com auxílio de um voltímetro de CA conectado aos bornes de saída.

Alguns varivolts já têm um voltímetro conectado aos bornes de saída, como pode ser visto na **Fig. 23**.

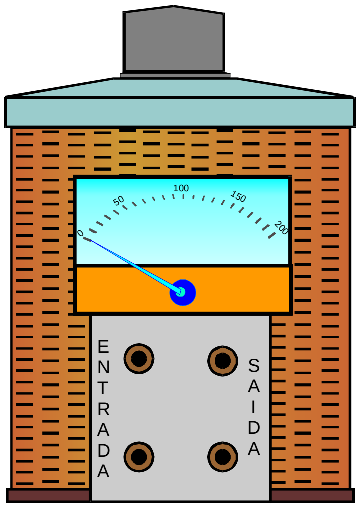
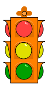


Fig.23 Vista frontal de um varivolt.

Para evitar danos ao voltímetro ou multímetro, o ajuste de tensão de saída deve ser executado através de uma seqüência de procedimentos.

- Girar o cursor totalmente no sentido antihorário. Com o cursor nesta posição, a tensão nos bornes de saída é praticamente nula “0”.
- Conectar um voltímetro de CA com escala apropriada para a tensão a ser ajustada.
- Girar o cursor no sentido horário até que o voltímetro indique a tensão desejada.


Por medida de segurança, não se deve executar conecções ou tocar a parte metálica dos bornes com o varivolt alimentado.

A **Fig.24** mostra o símbolo do varivolt, indicando os bornes de entrada e saída.

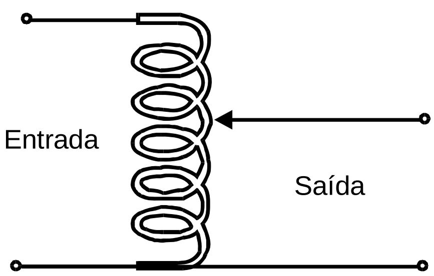


Fig.24 Representação simbólica de um varivolt.

Medição de tensão CA

A medição de tensão alternada consiste na utilização de instrumentos com o objetivo de determinar a tensão eficaz presente entre dois pontos onde existe uma CA. A medição de tensão alternada é muito utilizada na manutenção de equipamentos elétricos e eletrônicos, principalmente naqueles alimentados a partir da rede elétrica.

INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO DE TENSÃO ALTERNADA

A medição de tensão alternada pode ser realizada através de dois instrumentos:

- Voltímetro ou milivoltímetro, como mostrado na **Fig.24**.
- Multímetro em escala de CA, conforme ilustrado na **Fig.25**.

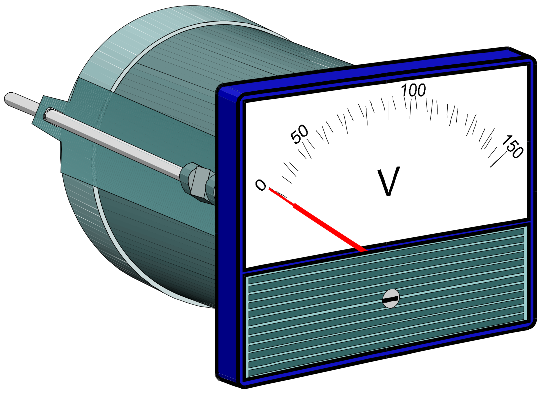


Fig.24 Voltímetro.

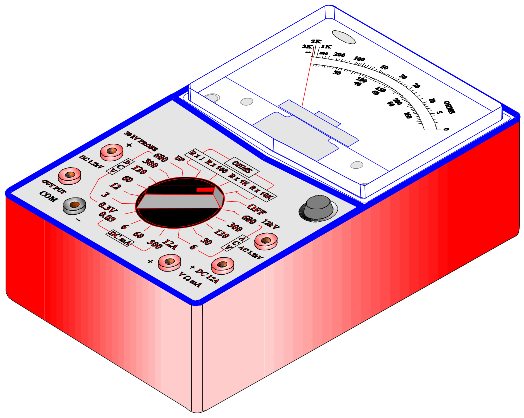


Fig.25 Multímetro.

Tanto os voltímetros de CA como os multímetros, fornecem a indicação da tensão eficaz presente entre os pontos medidos.

Os instrumentos de medição de tensão alternada fornecem a indicação de tensão eficaz. Sempre que se refere a valores de tensão CA em medições ou em esquemas (por exemplo, 110VCA, 220VCA, 12VCA etc.), estes valores correspondem a tensões eficazes.

Quando um valor de CA não é eficaz, deve ser identificado com o seu significado. Por exemplo: $220V_p$ (220 volts de pico) ou $70V_{pp}$ (70 volts de pico a pico).

VOLTÍMETRO DE CA

Os voltímetros destinados à medição de tensão alternada são identificados pelo símbolo na escala frontal, como pode ser visto na **Fig. 26**.

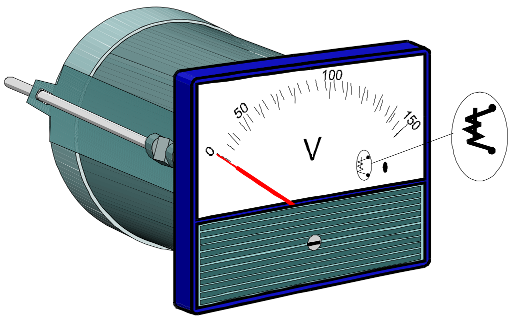


Fig.26 Símbolo do multímetro de tensão alternada.

Este símbolo identifica os instrumentos para CA que são instrumentos próprios para indicação de valores eficazes em CA.

Os instrumentos indicados pelo símbolo são versáteis porque seu princípio de funcionamento permite que sejam usados tanto para medições em CC como em CA.

Deve-se sempre verificar o tipo de instrumento adequado antes de realizar uma medição em CC ou CA. Devido ao fato de que em CA existe uma troca constante de polaridade, os bornes dos voltímetros de CA não têm polaridade para ligação.

Ao analisar-se uma medição, a ordem de conexão das pontas de prova é indiferente.

MULTÍMETRO

O multímetro pode ser utilizado para medição de tensão em CA.

A **Fig.27** mostra o painel de um multímetro típico.

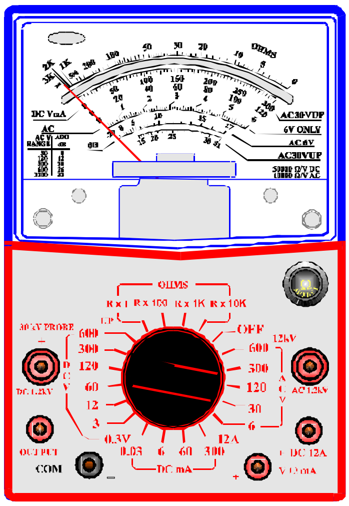


Fig.27 Multímetro usado na medição de CA.

BORNES

Na maioria dos tipos de multímetros comerciais, os bornes para as pontas de prova são os mesmos em CA ou cc, como ilustrado na **Fig.28**.

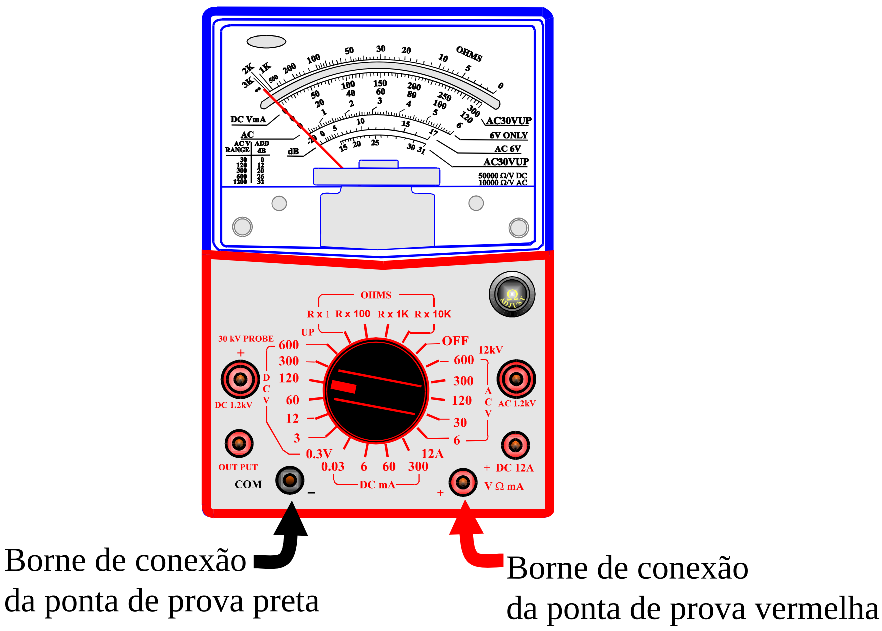


Fig.28 Bornes de conexão.

Em alguns multímetros a ponta de prova preta é conectada ao borne comum e a vermelha a um borne específico para medição de tensão em CA.

CHAVE SELETORA

As posições da chave seletora destinadas à medição de tensão são indicadas pelas abreviaturas ACV ou AC.

O valor indicado em cada uma das posições representa a tensão eficaz máxima que o instrumento pode medir nesta posição da chave seletora. Por exemplo, se a escala selecionada for ACV 300, a tensão eficaz máxima que o instrumento pode medir nesta posição da chave seletora é 300V.

ESCALAS

As escalas do multímetro para tensão CA são as mesmas utilizadas para tensão CC. Por esta razão, estas escalas normalmente estão identificadas pelas abreviaturas DC/AC (tensão contínua/tensão alternada).

Além destas escalas comuns para CC/CA, os multímetros têm ainda uma escala para medições de tensão AC de pequeno valor (6VCA ou menor). Esta escala normalmente é identificada com as abreviaturas AC 6V ou AC 6V ONLY. Esta escala existe porque em pequenos valores de tensão CA o multímetro provoca um pequeno erro de indicação. Este erro é corrigido no próprio instrumento através desta escala específica.

PROCEDIMENTO PARA MEDIÇÃO DE TENSÃO ALTERNADA COM MULTÍMETRO

O procedimento para utilização do multímetro em medições de tensão CA deve ser seguido rigorosamente para evitar danos ao instrumento. Este procedimento é:

- Conectar as pontas de prova dos bornes apropriados.
- Selecionar uma escala com valor superior à tensão eficaz que será medida.
- Conectar os pontos de prova nos pontos a serem medidos.
- Interpretar a leitura.

A interpretação da leitura se realiza da mesma forma que aquela para tensões contínuas: indicação do ponteiro em conjunto com a posição da chave seletora.

Por uma questão de princípio de funcionamento, nas escalas altas de tensão CA, o multímetro dificilmente pode sofrer danos por má operação. Por esta razão, quando um multímetro não dispõe de uma posição OFF (desligado) na chave seletora, ao se guardar o instrumento deve-se posicionar a chave seletora para a maior escala de tensão CA disponível (por exemplo, 1.000VAC).

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Qual a relação entre período e frequência ?
2. O que é tensão eficaz ?
3. O que é um varivolt ?
4. Que instrumentos são utilizados para medir a tensão CA ?

BIBLIOGRAFIA

SENAI/DN. **Corrente contínua e corrente alternada.** Rio de Janeiro, Divisão de Ensino e Treinamento, 1980, 71p. (Módulo Instrucional : Eletricidade-Eletrotécnica, 14).

VAN VALKENBURG, NOOGER & NEVILLE. **Eletricidade Básica.** 11.ª ed., Rio de Janeiro, Freitas Bastos, 1977, vol.3

UENO, PAULO TORN & YAMAMOTO, ISSAO. **Estudos da Física**, Eletricidade. 2.ª ed., São Paulo, Moderna, 1982, 352p.

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

O cliente é a razão do nosso trabalho, a fim de inseri-lo em um novo contexto social de competitividade e empregabilidade.

Introdução

Uma das formas mais práticas de se verificar se um aparelho alimentado por CA está funcionando corretamente é através da medição da corrente solicitada da rede elétrica. Se a leitura indica o valor de corrente nominal, significa que o aparelho está em boas condições.

Isso leva os fabricantes de eletrodomésticos e equipamentos elétricos a colocar na placa de especificações a corrente ou potência nominal de cada aparelho.

Este fascículo, que tratará dos instrumentos, da forma de medição da corrente em CA e da potência elétrica em CA, visa a capacitá-lo a executar medições de corrente e determinar a potência de consumidores em corrente alternada.

Para ter sucesso no desenvolvimento do conteúdo e atividades deste fascículo, o leitor deverá ter conhecimentos relativos a:

- Potência elétrica em CC.
- Corrente CC.

Medição de corrente alternada

A medição de corrente em CA consiste na utilização de instrumentos com o objetivo de determinar a corrente eficaz em um circuito. A medição de corrente em CA é utilizada para verificar se a corrente solicitada por um consumidor está de acordo com a sua corrente nominal.

INSTRUMENTOS PARA MEDIÇÃO DE CORRENTE EM CA

A medição de corrente em CA pode ser realizada através de : amperímetros ou miliamperímetros de CA, como o mostrado na **Fig.1** ou volt-amperímetros alicate, como o ilustrado na **Fig.2**.

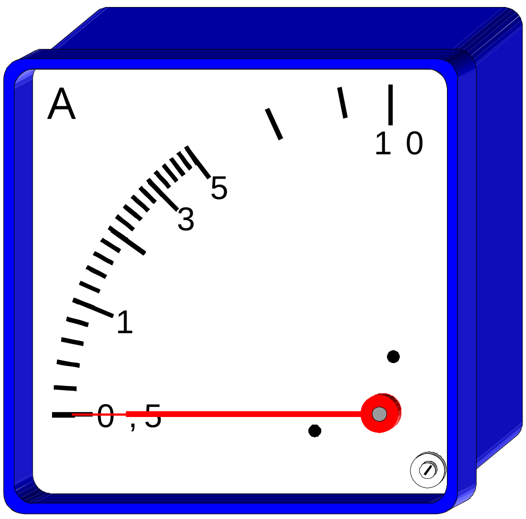


Fig.1 O amperímetro.

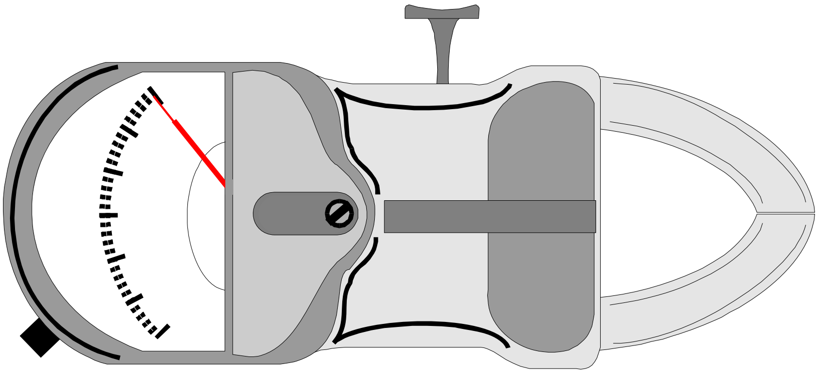


Fig.2 O volt-amperímetro alicate.

Somente alguns tipos de multímetros dispõem de recursos para medição de corrente alternada.

Tanto o miliamperímetro de CA, como o volt-amperímetro alicate, indicam o valor de **corrente eficaz**.

Os medidores de corrente em CA indicam valores eficazes.

Os medidores de corrente que podem ser utilizados em CA são identificados no painel através do símbolo destacado na **Fig.3**.

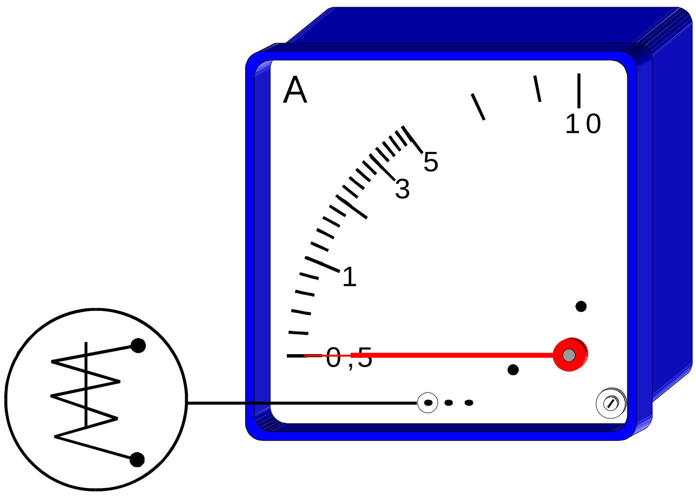


Fig.3 Medidor utilizado em CA com a indicação do respectivo símbolo.

Os amperímetros e miliamperímetros para corrente alternada têm dois bornes na parte posterior que se destinam a receber a corrente cujo valor será indicado na escala, como mostrado na **Fig.4**.

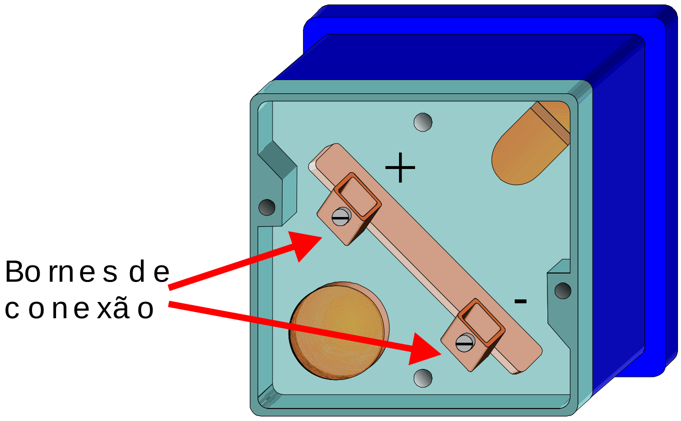
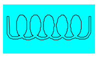


Fig.4 Bornes de ligação de um amperímetro.

Os bornes dos medidores de corrente em CA não apresentam indicação de polaridade porque em CA existe troca constante de polaridade.

Os miliamperímetros e amperímetros indicados pelo símbolo  ***podem ser utilizados tanto para medição em CA como em CC.***

CONEXÃO DO MEDIDOR

A medição de corrente através de amperímetros ou miliamperímetros exige a interrupção do circuito para colocação do instrumento em série. A **Fig. 5** ilustra este procedimento.

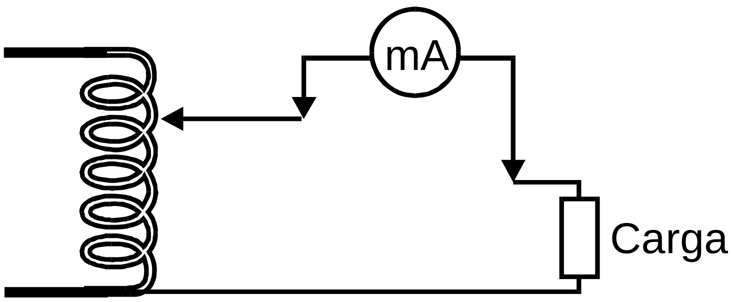


Fig.5 Conexão em série do amperímetro para medição de corrente.

SELEÇÃO DO INSTRUMENTO

Deve-se sempre utilizar um instrumento que tenha um valor de fundo de escala superior ao valor de corrente eficaz no circuito. Para isto, é necessário fazer uma estimativa do valor de corrente eficaz no circuito antes de escolher o instrumento.

VOLT-AMPERÍMETRO ALICATE

O volt-amperímetro alicate, como o mostrado na **Fig.2,** também conhecido como amperímetro alicate ou volt-amperímetro de gancho, é um instrumento que permite a indicação de tensões e correntes em CA.

Embora o volt-amperímetro alicate possibilite a medição de tensão em CA de forma semelhante a um multímetro, é na medição de corrente que este instrumento é mais utilizado.

A utilização mais freqüente do volt-amperímetro alicate como medidor de corrente se deve ao fato de que a medição de corrente é feita sem a necessidade de interromper o circuito.

A medição de corrente sem a interrupção do circuito é particularmente interessante quando os condutores deste circuito forem de grandes bitolas e as correntes relativamente altas.

As partes do volt-amperímetro alicate utilizadas para medição de corrente são mostradas na **Fig.6**.

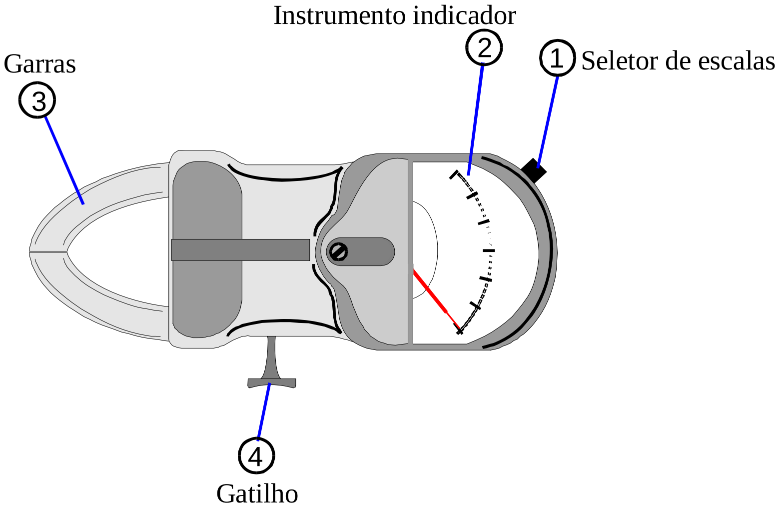


Fig.6 Partes de um volt-amperímetro alicate.

1-Seletor de escalas

É uma chave para a seleção do tipo de grandeza (tensão ou corrente) e a escala do instrumento. Existem amperímetros alicates que permitem a medição de correntes da ordem de até 1.000A.

2-Instrumento indicador

É o instrumento que faz a indicação do valor da corrente medida.

3-Garras

São garras em forma de alicate que têm por finalidade envolver o condutor que é percorrido pela corrente que se deseja medir.

4-Gatilho

Permite a abertura das garras para posicionar o instrumento para a medição.

PROCEDIMENTO PARA MEDIÇÃO

Para executar uma medição de corrente com amperímetro alicate, utiliza-se o seguinte procedimento:

- Selecionar a escala.
- Pressionar o gatilho, abrindo o gancho, como ilustrado na **Fig.7**.

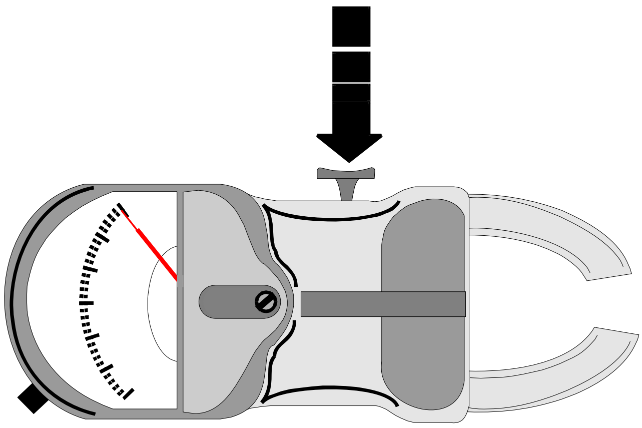


Fig.7 Pressão do gatilho para abertura do gancho.

- Envolver o condutor com gancho, como mostrado na **Fig.8**.

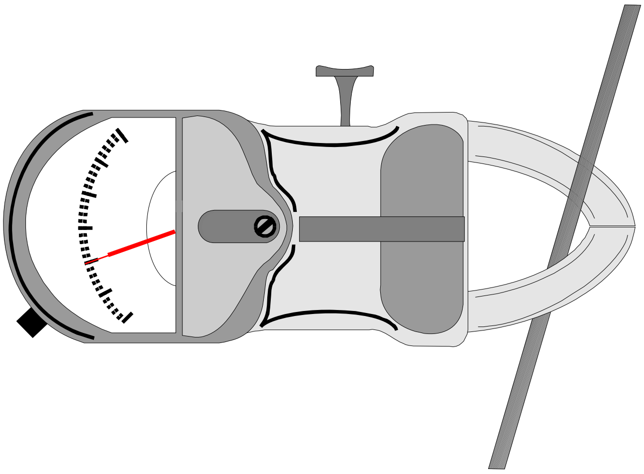


Fig.8 Envolvimento do condutor pelo gancho.

- Liberar o gatilho e realizar a leitura.

Quando o gancho se fecha o instrumento indica a corrente circulante no condutor.

Devido ao seu princípio de funcionamento, o amperímetro alicate não possibilita a medição de correntes menores que 1 ou 2 ampères, dependendo do modelo.

POTÊNCIA DISSIPADA

A potência P dissipada por um consumidor é função da tensão aplicada V e da corrente I circulante.

$$P = V \times I$$

Em corrente alternada, a potência dissipada é função da tensão eficaz e da corrente eficaz no consumidor:

$$P = V_{ef} \times I_{ef}$$

A seguir são apresentados dois exemplos de aplicação da equação da potência em CA.

Exemplo 1:

Um aquecedor elétrico cuja tensão nominal é 110VCA absorve uma corrente de 6ACA da rede elétrica. Qual a potência do aquecedor?

Solução

$$P = V \times I$$

$$V_{ef} = 110\text{V}$$

$$I_{ef} = 6\text{A}$$

$$P = 110 \times 6 = 660\text{W}$$

Exemplo 2:

A placa de identificação de uma torneira elétrica traz as seguintes características:

Tensão nominal: V=220V
Potência: P=1.800W

Qual a corrente absorvida pela torneira elétrica?

Solução

$$P = V \times I$$

$$I = P/V$$

$$I = 1.800\text{W}/220\text{V} = 8{,}18\text{A}$$

Como os instrumentos de medição em CA, tais como voltímetros e amperímetros, fornecem sempre a indicação dos valores eficazes (E_{ef} e I_{ef}), a potência dissipada em um consumidor ligado em CA pode ser determinada por medição. A **Fig.9** ilustra este procedimento.

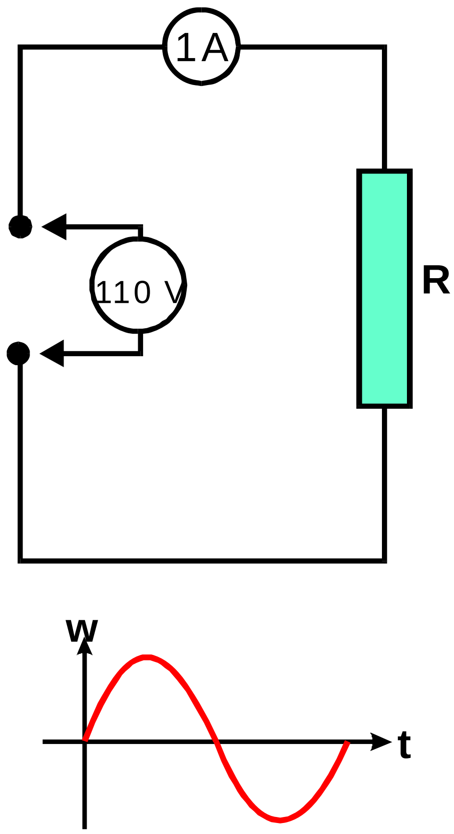


Fig.9 Medição da potência dissipada por um consumidor ligado em CA.

Sempre que valores fornecidos para a determinação da potência não forem os valores eficazes, deve-se realizar a conversão antes de usar a equação.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Que instrumentos medem a corrente em CA ?

2. Quais as partes principais de um volt-amperímetro alicate ?

BIBLIOGRAFIA

SENAI/Departamento Nacional. **Potência em CA.** Rio de Janeiro, Divisão de Ensino e Treinamento, 1980, 69p. (Módulo Instrucional: Eletricidade - Eletrotécnica, 9).

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Valorização das Pessoas – Reconhecimento e respeito ás pessoas pelo seu trabalho e valorização destas como agentes de mudança.

Introdução

A utilização de instrumentos de medição é uma constante na vida diária das pessoas que trabalham com eletricidade e eletrônica.

Os instrumentos usados são os mais diversos e cabe às pessoas não apenas saberem utilizá-los corretamente, mas também terem ciência dos erros e tolerâncias existentes em uma medição.

Este fascículo tratará dos erros de medição, tanto no que diz respeito aos proporcionados pelo próprio instrumento, quanto aos ocasionados pelo operador, visando com isso capacitá-lo a utilizar conscientemente os instrumentos de medição.

Para ter sucesso no desenvolvimento do conteúdo e atividades deste fascículo, o leitor deverá ter conhecimentos relativos a:

- Medição de tensão.
- Medição de corrente.

Erros em medição

Erro é uma diferença entre o valor real da grandeza medida e o valor indicado pelo instrumento. A **Fig.1** ilustra este conceito.

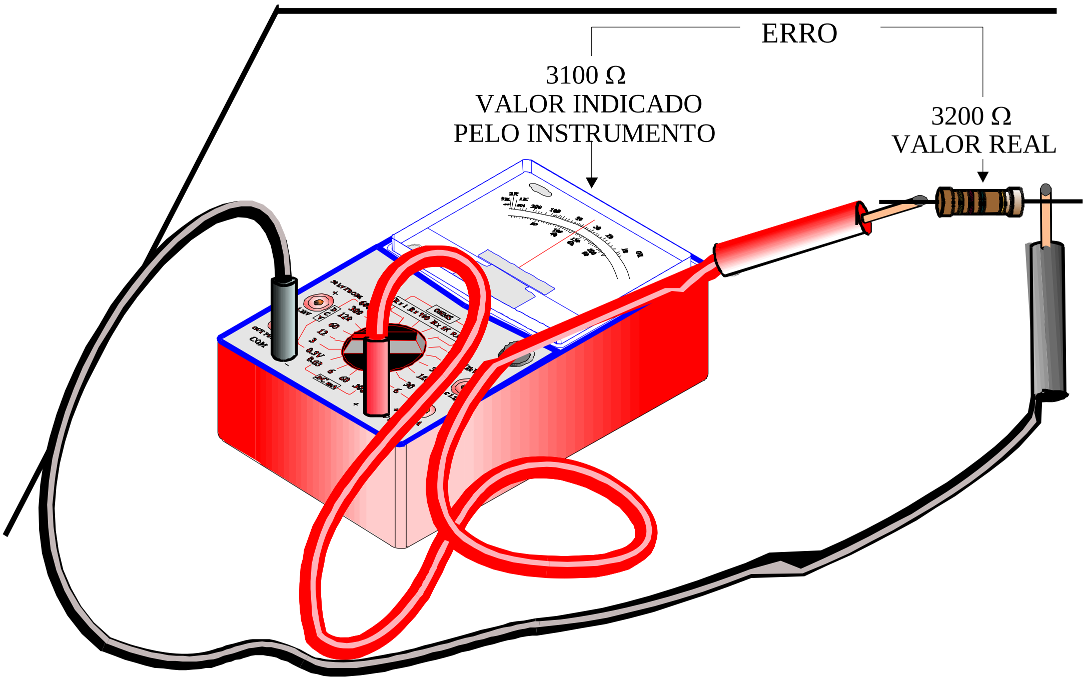


Fig.1 Erro de um instrumento.

Os instrumentos se apresentam em uma grande variedade e com diferentes padrões de qualidade. De modo geral, quanto menor o erro introduzido em uma medição, tanto melhor o instrumento.

A qualidade do instrumento é definida através de um parâmetro denominado de **classe do instrumento**.

As classes dos instrumentos são dadas em percentuais, tais como: classe 1,5, classe 1, classe 0,5 e classe 0,1.

Alguns instrumentos trazem a classe impressa na escala em lugar visível ao usuário, como o instrumento de painel mostrado na **Fig.2**.

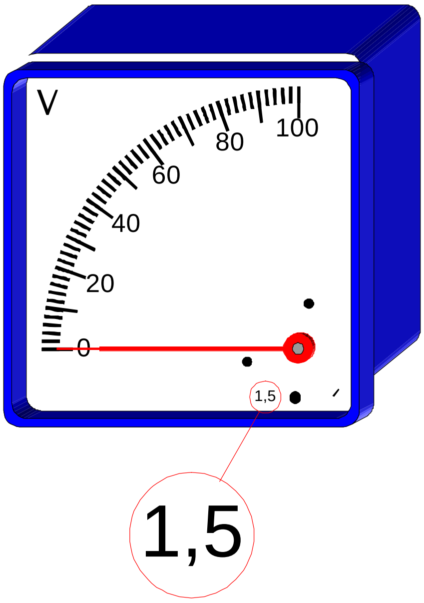


Fig.2 Indicação da classe no instrumento de painel.

Conhecendo-se a classe de um instrumento, pode-se determinar o valor máximo do desvio Δx provocado por ele através da equação:

$$\Delta x = \frac{x \times cl}{100} \qquad (1)$$

onde x é o valor do fundo de escala do instrumento e cl a classe.

Por exemplo, um voltímetro com escala de 250V e classe 1 introduz um desvio máximo na indicação de:

$$\Delta x = \frac{x \times cl}{100} = \frac{250 \times 1}{100} = 2{,}5V$$

Como esse desvio pode ocorrer tanto para mais como para menos do valor real, escreve-se $\Delta x = \pm 2{,}5V$.

O desvio (Δx) calculado através dessa equação é denominado também de **erro absoluto** porque o seu valor depende apenas de fatores inerentes ao instrumento (classe e valor de fundo de escala), sendo independente do valor que o instrumento está medindo.

Isto pode ser esclarecido através de um exemplo. Um multímetro com fundo de escala 250V e classe 1 tem um erro absoluto de ±2,5V (calculado anteriormente).

- Se este voltímetro está indicando 100V, o valor real da tensão pode estar entre 97,5 e 102,5V (100V ±2,5V).

- Se este voltímetro está indicando 20V, o valor real da tensão pode estar entre 17,5V e 22,5V (20V ±2,5V).

Obviamente um erro de ±2,5V em medições como 100V, 120V ou mais, não chega a ser importante.

Entretanto, ±2,5V são significativos em medições como 20V, 30V e assim por diante.

Para se saber o quanto um erro é significativo em relação a uma medição, calcula-se o **erro relativo** Δp :

$$\Delta p = \frac{\Delta x}{M} \times 100 \qquad (2)$$

onde Δx é o erro absoluto e M é o valor medido com o instrumento.

<u>Exemplo 1</u>:

Determinar o erro absoluto de u voltímetro de 250V, classe 1 e os erros relativos nas medições de 100V e 20V.

<u>Solução</u> :

Erro absoluto $\Delta x = \pm 2{,}5V$

na medição de 100V $\Rightarrow$ $\Delta p = \frac{2{,}5}{100} \times 100 = 2{,}5$

<u>erro relativo 2,5%</u>

na medição de 20V $\Rightarrow$ $\Delta p = \frac{2{,}5}{20} \times 100 = 12{,}5$

<u>erro relativo 2,5%</u>

Verifica-se que um voltímetro de 250V classe 1 não é apropriado para medir tensões da ordem de 20V porque o erro percentual na medição é muito grande.

Daí, pode-se concluir que a indicação será mais precisa quanto mais próximo ao fundo da escala for o valor medido. Esta conclusão é válida para instrumentos de escala linear. Em instrumentos de escala não linear, tais como ohmímetros e voltímetros de CA, a indicação mais precisa ocorre no centro da escala.

Erros devido ao posicionamento

Além do erro provocado pelo instrumento, existem os seguintes fatores que interferem na confiabilidade de uma medição :

- O posicionamento do instrumento.
- O posicionamento do observador.

POSICIONAMENTO DO INSTRUMENTO

Os instrumentos de medição com indicação através de ponteiro, têm posição correta de trabalho definida. Existem instrumentos cuja posição correta de trabalho é vertical, outros horizontal e ainda alguns que são construídos para trabalhar em posição inclinada.

Alguns instrumentos trazem um símbolo no painel que indica a posição adequada de funcionamento, como mostrado na **Fig. 3**.

Os símbolos empregados são:

- **Vertical** ⊥ .
- **Horizontal** ∏ **.**
- **Inclinada** ∠**.**

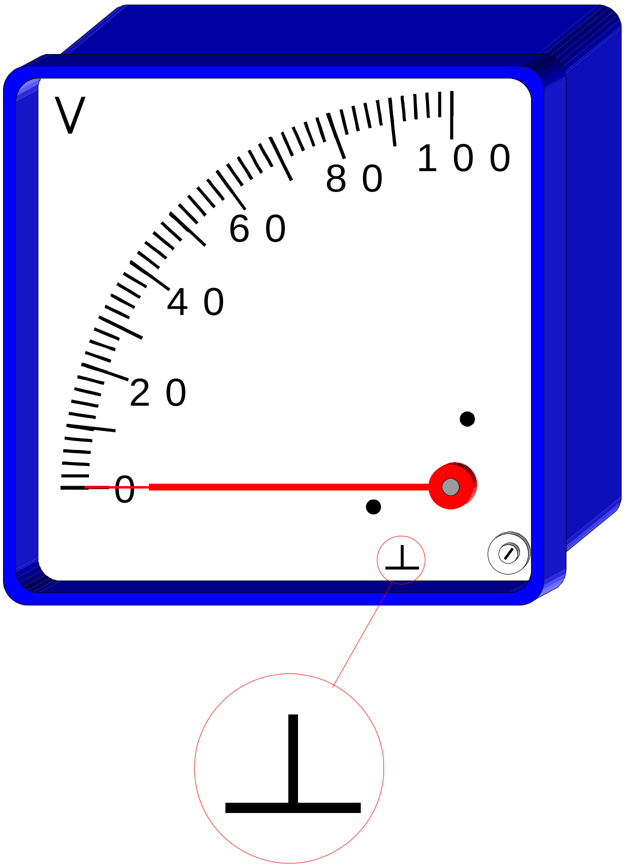


Fig.3 Instrumento para operação na vertical.

No caso de multímetros, a posição de trabalho correta é horizontal.

Instrumentos como o osciloscópio que não têm peças móveis, podem operar em qualquer posição sem prejuízo para a indicação. Contudo, o operador deve procurar posicionar este tipo de instrumento de forma a ter visibilidade perfeita para a leitura.

POSICIONAMENTO DO OBSERVADOR

Outro fator de grande importância para a maior exatidão de uma medição é o posicionamento do observador para realizar a leitura.

Um único instrumento pode dar origem a três leituras diferentes se três observadores estiverem em posições diferentes, como ilustrado na **Fig.4**.

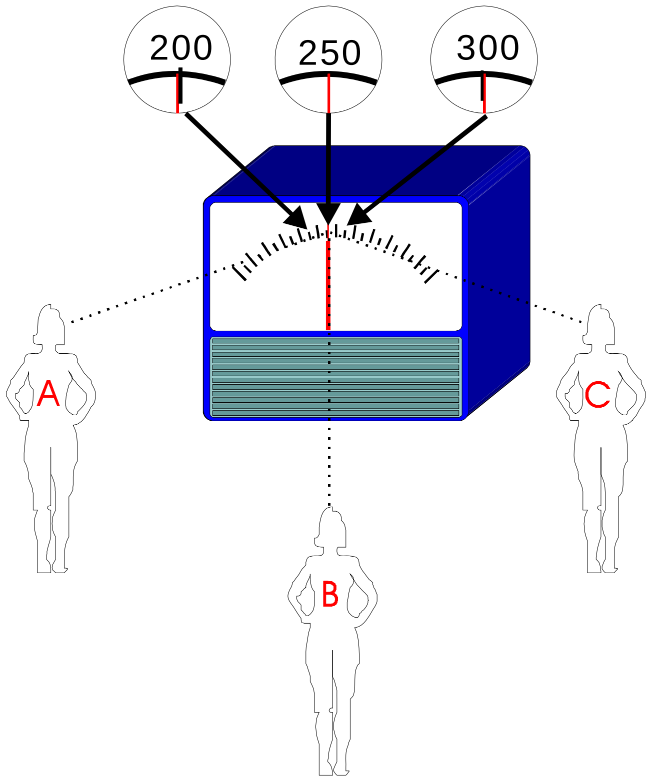


Fig.4 Leituras que dependem da posição do observador.

Dos três observadores, apenas o "B" está em posição correta para a leitura, formando um ângulo de 90º em relação ao painel do instrumento. É portanto, o único que pode realizar uma leitura correta.

Este tipo de erro provocado pelo posicionamento do observador é denominado de **erro de paralaxe**.

Erro de paralaxe é o erro provocado por um mau posicionamento do observador para a leitura.

Alguns instrumentos dispõem de um aparelho na escala que serve para orientação do observador ao se posicionar.

A posição correta para a leitura é aquela em que o reflexo do ponteiro no espelho está escondido atrás do próprio ponteiro (o reflexo não é visível ao observador).

Efeito de carga

Todo o instrumento de medição absorve uma determinada corrente do circuito a que está ligado. Essa corrente é necessária para o seu funcionamento, como a corrente I_m na **Fig.5**.

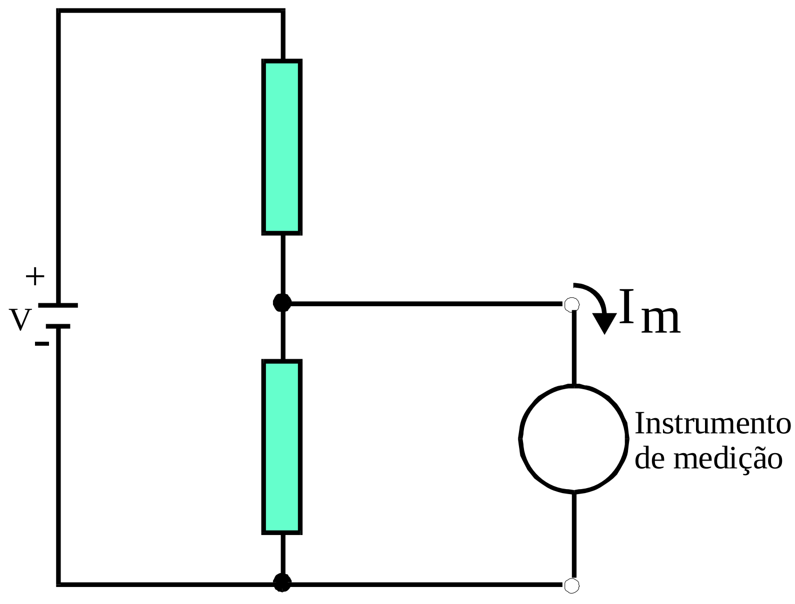


Fig.5 Corrente I_m é necessária para o instrumento operar.

Na maioria dos instrumentos, esta corrente é pequena, com valores típicos da ordem de microampères.

Denomina-se de **sensibilidade de um instrumento** a intensidade de corrente necessária para provocar a deflexão total do seu ponteiro.

Sensibilidade de um instrumento é o valor de corrente que provoca a deflexão do seu ponteiro.

IMPEDÂNCIA DE ENTRADA DE UM INSTRUMENTO

Se um instrumento de medição absorve uma certa corrente do circuito, pode-se dizer que este instrumento apresenta uma **resistência interna** entre os seus bornes, como mostrado na **Fig.6**.

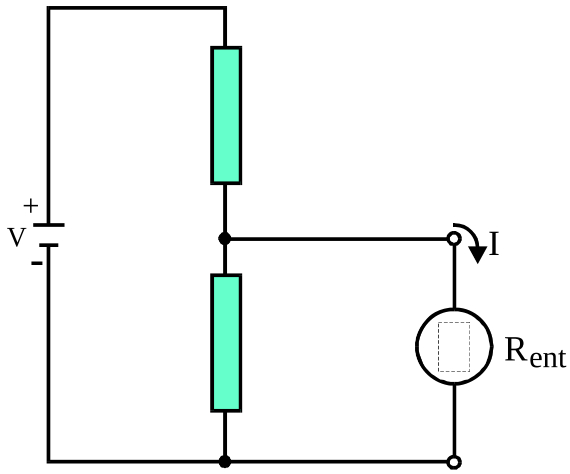


Fig.6 Impedância de entrada de um instrumento.

Esta **resistência** que o instrumento apresenta entre seus bornes é denominada de **impedância de entrada do instrumento (R_{ent}).**

A impedância é muito importante principalmente para os voltímetros. A impedância de entrada de um voltímetro normalmente não é fornecida diretamente, mas pode ser determinada se a sensibilidade é conhecida.

Primeiro determina-se a característica ohms por volt (Ω/V) do voltímetro:

$$\frac{\Omega}{V} = \frac{1}{I_m} \qquad (1)$$

onde I_m é a sensibilidade do instrumento.

Através da característica **Ω/V**, pode-se determinar a impedância de entrada do voltímetro, da seguinte forma :

$$R_{ent} = \frac{\Omega}{V} \times x \qquad (2)$$

onde $\mathbf{R_{ent}}$ é a impedância de entrada, **x** o valor de fundo de escala do instrumento e **Ω/V** a relação ohms por volt do instrumento.

Exemplo 1:

Um voltímetro para 25V deflexiona totalmente o ponteiro com uma corrente de 30μA. Qual a característica **Ω/V** do instrumento e sua impedância de entrada?

Solução :

$$\frac{\Omega}{V} = \frac{1}{I_m} = \frac{1}{30\,\mu A} = \frac{33k\Omega}{V}$$

$$R_{ent} = \frac{\Omega}{V} \times x = 33 \times 25 = 825\,k\Omega$$

Isto significa que um voltímetro de 25V com sensibilidade de 30μA se comporta como um resistor de 825 kΩ.

Suponha que o voltímetro de 25V citado seja utilizado para medir a tensão de saída de um divisor de tensão.

Ao conectar-se o voltímetro ao circuito, a sua resistência interna de 825kΩ fica em paralelo com a saída do divisor, atuando como se fosse uma carga, como ilustra a **Fig.7**.

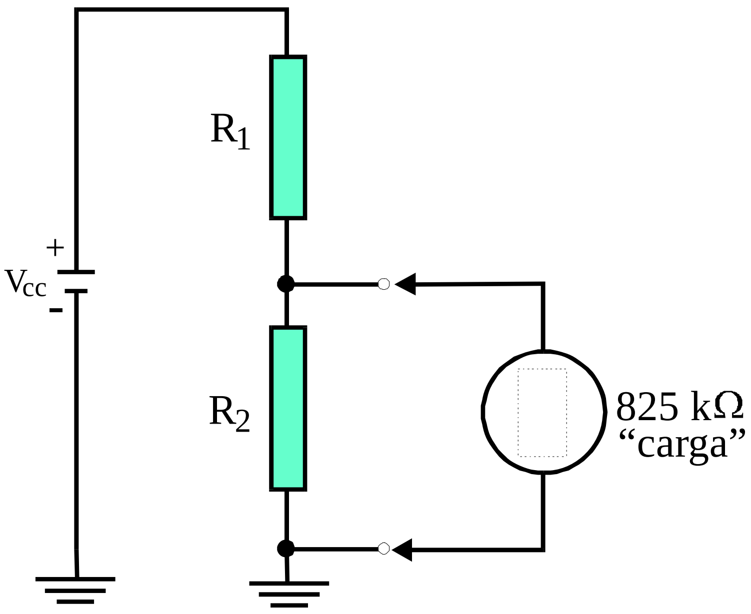


Fig.7 O instrumento atua como carga no circuito.

Este paralelismo entre o voltímetro e a saída provoca uma redução de tensão fornecida pelo divisor, alterando o seu comportamento.

Esta relação não deveria acontecer, visto que o instrumento deve possibilitar a medição sem alterar o comportamento do circuito.

Quando ocorrem alterações no comportamento de um circuito devido a uma medição com um instrumento, diz-se que o circuito foi **carregado** pelo instrumento.

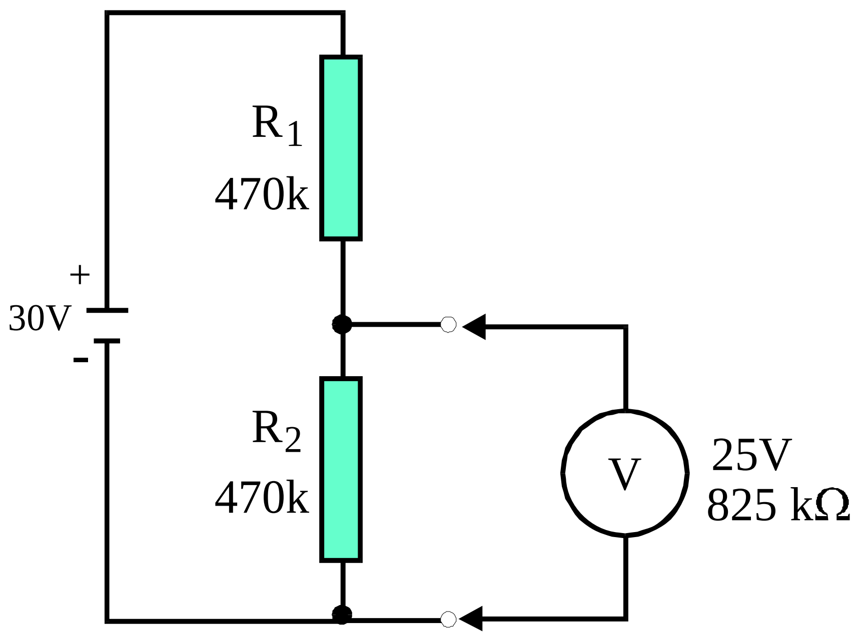
O **efeito de carga** provocado por um instrumento pode prejudicar completamente a precisão de uma medição.

Para ilustrar o efeito de carga, o seguinte exemplo determina a alteração que o instrumento provoca em uma medição.

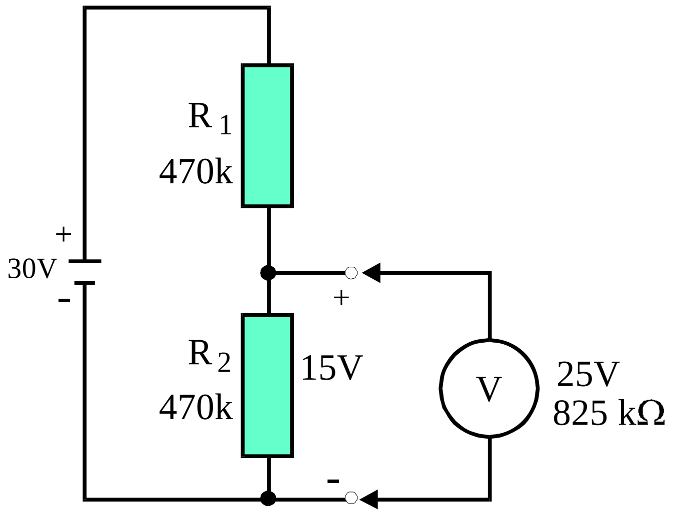
Exemplo 2:

Tomando-se o divisor de tensão da figura abaixo, e o voltímetro de 25V com I_m = 30μA (R_{ent} = 825kΩ já calculada no **Exemplo 1**), verifique o seu efeito sobre a medição em R_2 .

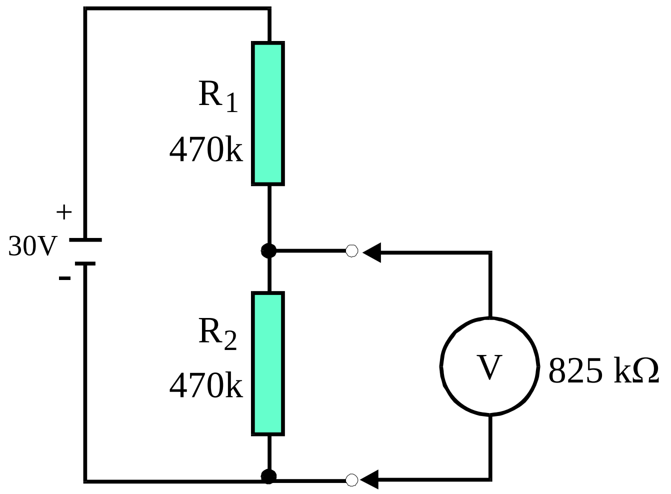
Solução :

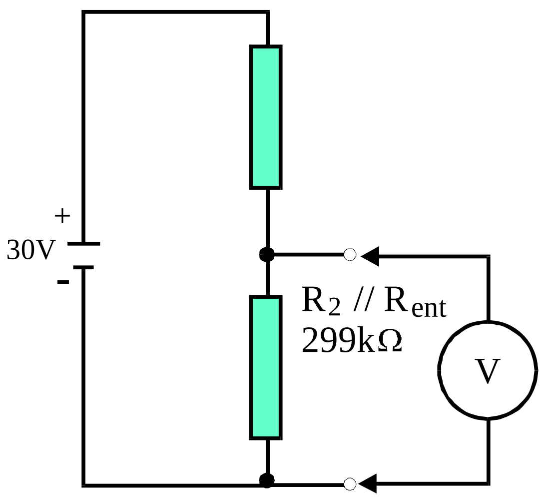


Enquanto o voltímetro não é conectado, a tensão de saída é 15V porque os resistores R_1 e R_2 são iguais.



Ao ligar o voltímetro, associam-se em paralelo o resistor R_2 e a impedância de entrada do voltímetro, como mostram as figuras que se seguem.





Recalculando-se o divisor, verifica-se que, ao conectar o voltímetro, a tensão de saída cai de 15V para 11,7V devido ao efeito de carga.

Quem estiver lendo o voltímetro concluirá que há um problema, pois a tensão de saída é 11,7V quando deveria ser 15V. Na verdade, o divisor está correto.

A partir do que foi exposto, podem-se tirar duas conclusões importantes:

- Quanto maior for a impedância de entrada de um voltímetro, menor será o efeito de carga provocado no circuito.
- Quanto maiores forem os valores de resistência de um circuito maior será a influência provocada pelo voltímetro.

Como os valores de resistência de um circuito dificilmente podem ser alterados, cabe ao técnico **utilizar voltímetros com a maior impedância de entrada possível,** minimizando-se, assim, o efeito de carga.

IMPEDÂNCIA DE ENTRADA DO VOLTÍMETRO

Os multímetros sempre trazem a característica Ω/V gravada no seu painel. Em geral são dois valores: um para AC e outro para DC.

Por exemplo, pode-se encontrar no painel de um multímetro a seguinte inscrição: DC 50kΩ/V, AC 10kΩ/V.

Para saber qual a impedância de entrada em cada escala, usa-se o valor Ω/V correspondente (em DC ou AC) multiplicado pela escala em questão:

Exemplo 3:

Suponha-se um multímetro com as seguintes características:

Escalas

DCV 600; 250; 60; 25	DC-50kΩ/V
ACV 1.000; 600; 100; 60	AC-10kΩ/V

Determinar a impedância da entrada nas escalas DCV600; DCV25 e ACV100.

Solução :

a) A impedância de entrada na escala DCV600 :

$$R_{ent} = \frac{\Omega}{V} \times x$$

$$R_{ent} = \frac{50k\Omega}{V} \times 600V = 30.000k\Omega$$

b) A impedância de entrada na escala DCV25 :

$$R_{ent} = \frac{\Omega}{V} \times x$$

$$R_{ent} = \frac{50k\Omega}{V} \times 25V = 1.250k\Omega$$

$$R_{ent} = 1{,}25M\Omega$$

c) A impedância de entrada na escala ACV100 :

$$R_{ent} = \frac{\Omega}{V} \times x$$

$$R_{ent} = \frac{10k\Omega}{V} \times 100V = 1.000k\Omega$$

$$R_{ent} = 1M\Omega$$

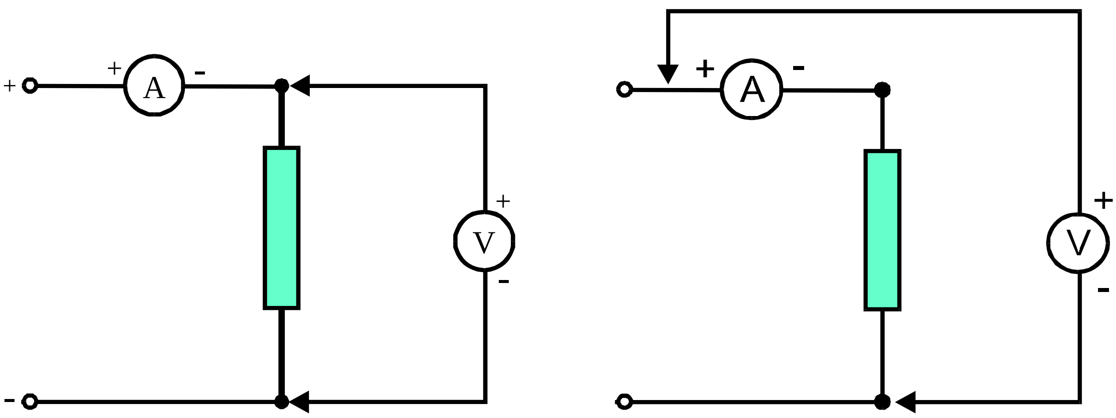
Erros nas medições simultâneas de corrente e tensão

Os medidores de corrente são muito empregados em eletrônica, principalmente para o levantamento das características de componentes em laboratórios.

Dependendo da forma como esses instrumentos são conectados ao circuito, podem ocorrer erros de medição.

Suponha, por exemplo, que se necessite medir a corrente e a tensão em um componente.

Existem duas formas de realizar essas medições, como mostrado na **Fig.8**



(a) (b)

Fig.8 Formas de medir tensão e corrente em um componente.

No circuito da **Fig.8a** o voltímetro indica a tensão no componente, mas o amperímetro indica a corrente do componente mais a corrente do voltímetro, como mostrado em detalhe na **Fig.9**.

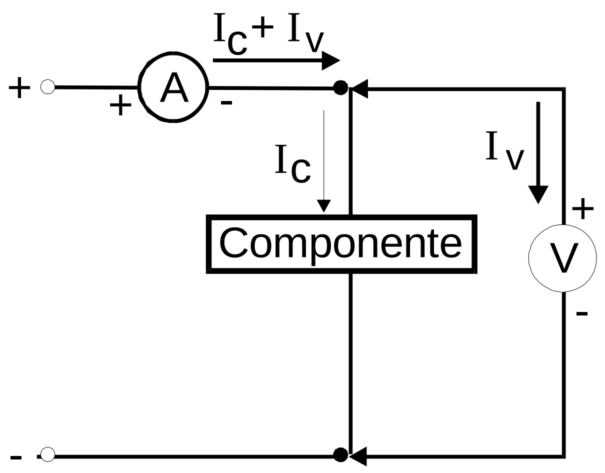


Fig.9 O amperímetro indica I_c+I_v .

No circuito da **Fig.8b** o amperímetro indica a corrente no componente, mas o voltímetro indica a tensão no componente mais a queda de tensão no amperímetro, como ilustrado na **Fig.10**.

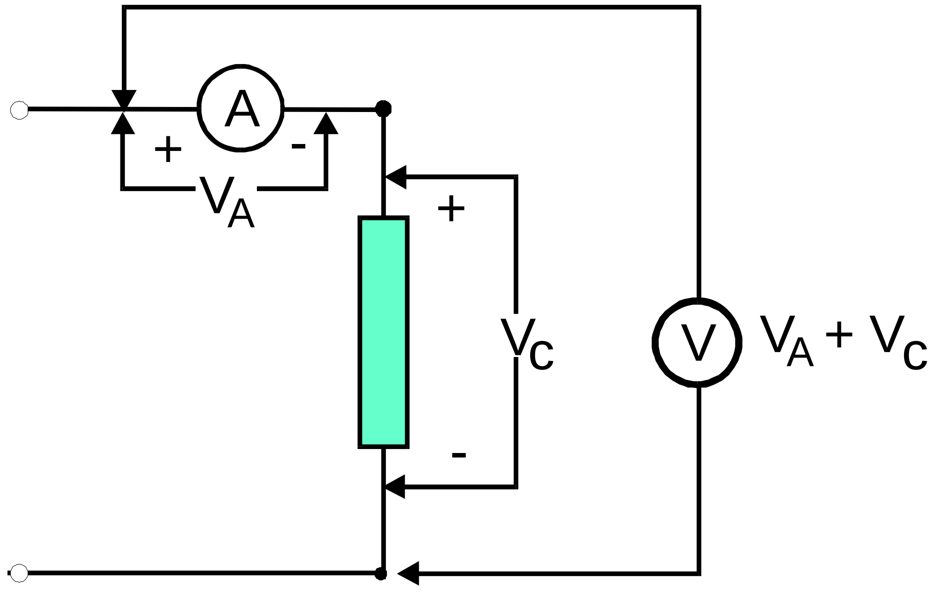


Fig.10 O voltímetro indica $V_A + V_C$.

Conclui-se que nenhum dos circuitos fornece, ao mesmo tempo, indicações corretas de corrente e de tensão apenas num componente. Isto significa que é necessário determinar qual a configuração mais adequada para cada situação.

APLICAÇÕES DAS CONFIGURAÇÕES DE MEDIÇÃO

As medições de tensão realizadas em eletrônica são obtidas com o multímetro. Em geral, os multímetros têm uma característica Ω/V em DC superior a 20kΩ/V, absorvendo correntes da ordem de 50μA ou menos.

Por esta razão, o circuito utilizado para medição é, na maioria das vezes, o mostrado na **Fig.11**.

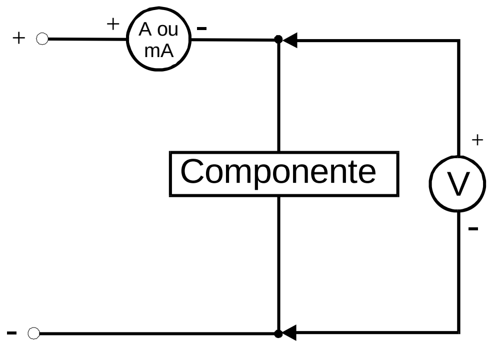


Fig.11 Configuração usual para medição de tensão e corrente .

Este circuito não é utilizado apenas quando a corrente a ser medida implicar no uso de microamperímetro.

Nas ocasiões em que for necessário empregar um microamperímetro, deve-se utilizar a outra configuração de medição, como pode ser visto na **Fig.12**.

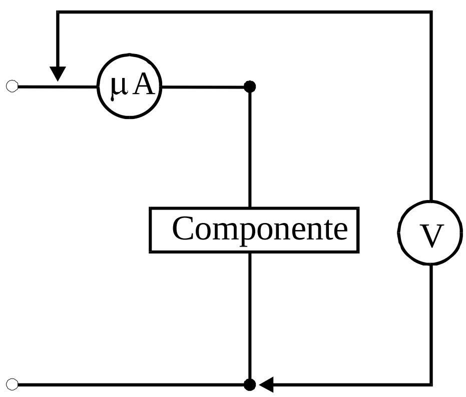


Fig.12 Configuração para medição de corrente e tensão se esta é superior a 1,5V.

Existe ainda uma ressalva com relação a este tipo de medição. Os microamperímetros geralmente provocam uma queda de tensão da ordem de 0,15V. Por esta razão esta configuração deve ser utilizada apenas para tensões de entrada superiores a 1,5V.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. O que vem a ser erro em uma medição ?

2. O que é "classe do instrumento" ?

3. O que é erro de paralaxe ?

4. O que é sensibilidade de um instrumento ?

BIBLIOGRAFIA

SENAI/DN. **Reparador de circuitos eletrônicos**; eletrônica industrial. Rio de Janeiro. (Coleção Básica SENAI. Módulo 9).

ZBAR, PAUL B. **Instrumentos e medidas em eletrônica**, Práticas de laboratório. Trad. Aracy Mendes da Costa. São Paulo, McGraw Hill, 1978, 229p.

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Imagem Institucional – Desenvolver ações que atendam as reais necessidades do mercado.

Introdução

No exercíco de atividades relacionados com a manutenção, o profissional de eletrônica tem contato com as mais diversas situações.

Em muitas ocasiões, os técnicos se utilizam de equipamentos que auxiliam na pesquisa e correção de defeitos em aparelhos.

O gerador de funções é um desses equipamentos, utilizado principalmente na manutenção de equipamentos de som e imagem.

Este fascículo tratará de gerador de funções, visando a capacitá-lo a operar corretamente este equipamento tão utilizado no dia a dia dos profissionais de eletrônica.

Para ter sucesso no desenvolvimento do conteúdo e atividades deste fascículo, o leitor deverá ter conhecimentos relativos a:

- Corrente alternada.
- Resistência interna.

Gerador de funções

É um equipamento que fornece tensões elétricas com diversas formas de onda. Estas tensões são denominadas de **sinais elétricos**.

O gerador de funções é utilizado para calibração e reparo de circuitos eletrônicos.

CARACTERÍSTICAS DE GERADORES DE FUNÇÕES

As características fundamentais dos geradores de funções são:

- Tipos de sinal fornecidos.
- Faixas de freqüência.
- Tensão máxima de pico a pico na saída.
- Impedância de saída.

TIPOS DE SINAL FORNECIDOS

Esta característica varia de modelo para modelo. Entre os tipos de sinais que são fornecidos pelos geradores, tem-se: onda senoidal, onda quadrada, dente de serra e onda triangular, conforme ilustrado na **Fig.1**.

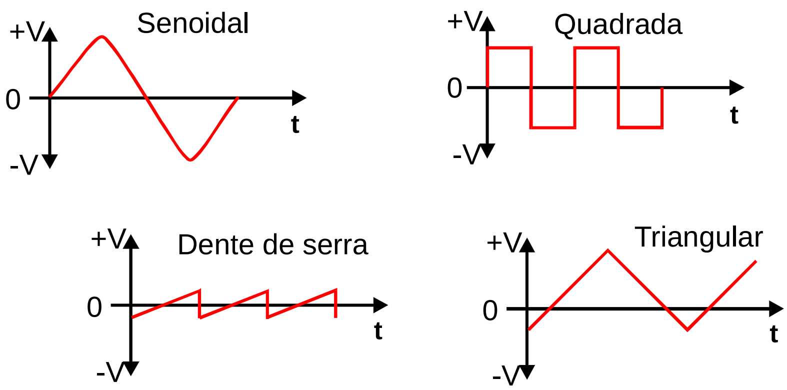


Fig.1 Formas de onda senoidal, quadrada, dente de serra e triangular.

FAIXA DE FREQÜÊNCIA

Os geradores de função fornecem sinais em uma freqüência que vai desde 1Hz podendo atingir até alguns megahertz, dependendo da marca e do modelo.

Os manuais de cada gerador de funções, fornecidos pelos fabricantes, informam a faixa de freqüência que o equipamento pode fornecer. Por exemplo, de 1Hz a 20kHz.

TENSÃO MÁXIMA DE PICO A PICO NA SAÍDA

É o valor máximo de amplitude do sinal que o gerador pode fornecer, como mostrado na **Fig.2**.

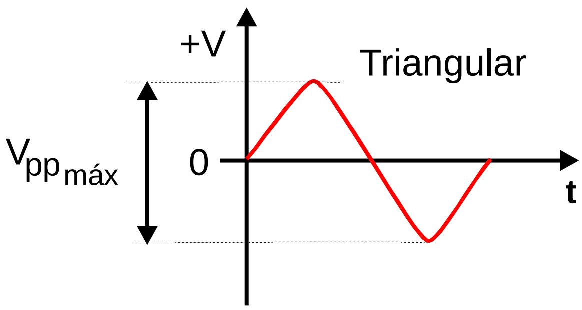


Fig.2 Tensão máxima de pico a pico.

IMPEDÂNCIA DE SAÍDA

É a impedância que o gerador apresenta entre os terminais de saída. Os geradores podem ter:

- Alta impedância de saída: são geradores apropriados para trabalhos em circuitos a válvula.
- Média impedância de saída: são geradores apropriados para trabalhos em circuitos transistorizados. Em geral estes geradores de funções têm uma impedância de 600Ω.
- Baixa impedância de saída: são geradores utilizados para trabalhos em circuitos digitais. Em geral têm uma impedância de saída em torno de 50Ω.

É importante conhecer esta característica dos geradores de sinais para que se possa obter a máxima transferência de potência entre gerador e carga.

DISPOSITIVOS DE CONTROLE

O painel de controle dos geradores de sinais apresenta uma série de dispositivos cuja finalidade é ajustar o equipamento de acordo com as condições necessárias.

A **Fig.3** apresenta um modelo de gerador de funções, com o painel de controles em destaque.

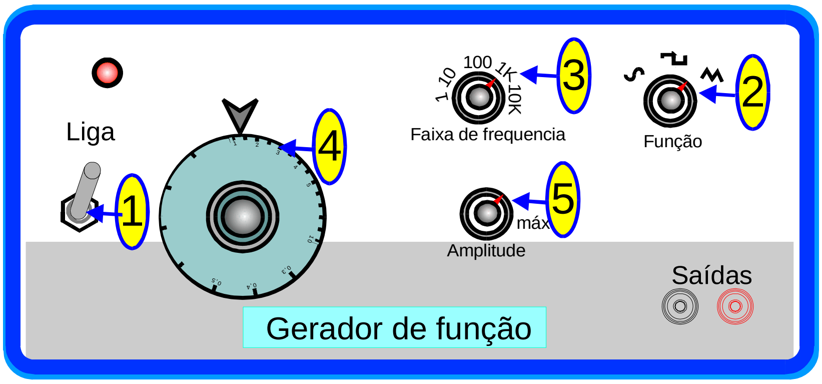


Fig.3 Gerador de funções típico.

Nos geradores de funções são comuns os seguintes dispositivos de controle:

01 - **CHAVE LIGA-DESLIGA** - É utilizada para ligar e desligar o equipamento.

02 - **CHAVE SELETORA DE SINAL** - Seleciona a forma de onda do sinal de saída.

03 - **CHAVE SELETORA DE FAIXA DE FREQÜÊNCIA** - Encontrado em geradores que fornecem valores de freqüência em uma ampla faixa (por exemplo de 10Hz a 100kHz). Este seletor possui diversas posições, permitindo que se escolha a faixa de freqüência desejada (de 100Hz a 1.000Hz; 1.000Hz a 100.000Hz, por exemplo).

04 - **CONTROLE DE FREQÜÊNCIA FORNECIDA (DIAL)** - É um controle acoplado a uma escala. Através do seu ajuste é estabelecida a freqüência do sinal fornecido pelo gerador, dentro dos limites definidos pelo seletor da faixa de operação.

05 - **CONTROLE DE NÍVEL DE SAÍDA** - Permite o ajuste da amplitude (pico a pico) do sinal de saída.

Existem geradores de funções mais sofisticados que dispõem de outros controles. Para uma correta compreensão de cada um desses controles adicionais, deve-se consultar o manual do equipamento.

INFLUÊNCIA DA CARGA NA AMPLITUDE DO SINAL

Os geradores de sinais apresentam uma impedância interna. Esta impedância interna tem um efeito semelhante a uma resistência elétrica colocada no interior do aparelho.

Assim como as pilhas e baterias, esta impedância de saída do gerador pode ser representada por um resistor em série com os bornes de saída, como mostrado na **Fig.4.**

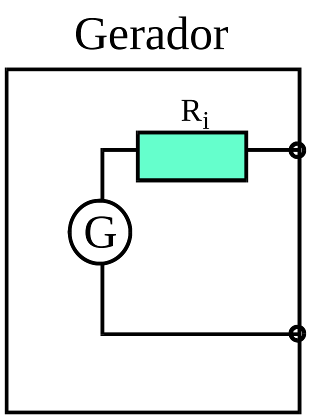


Fig.4 Representação da impedância interna de um gerador de funções.

Como conseqüência da existência dessa resistência **em série** com a saída do gerador, a amplitude do sinal sofre uma redução quando a carga é ligada. Esta redução se deve ao fato de que a impedância interna provoca uma queda de tensão quando o gerador fornece corrente ao circuito. O efeito é semelhante à queda de tensão que ocorre nas pilhas e baterias devido a suas resistências internas, conforme ilustrado na **Fig.5**

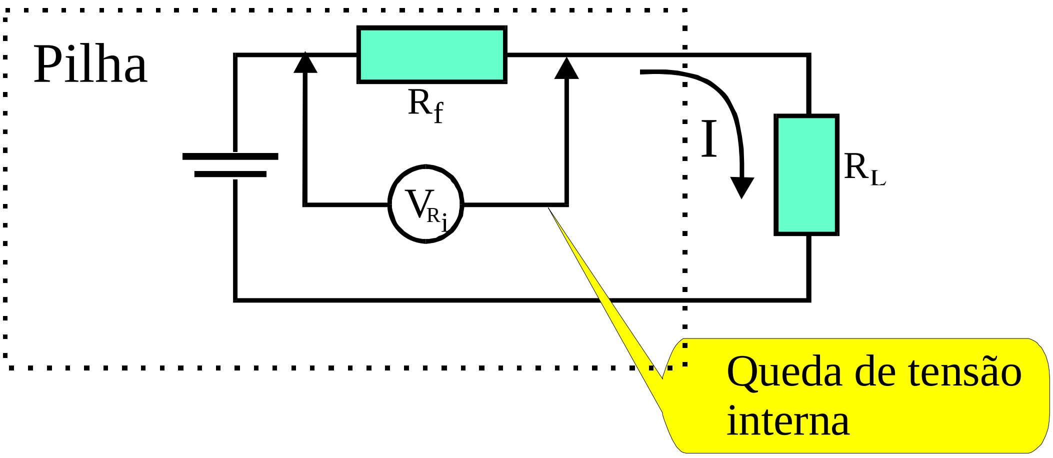


Fig.5 Queda de tensão interna.

Quanto maior for a carga a ser alimentada, maior será a corrente fornecida pelo gerador e por conseguinte maior será a queda de tensão interna no gerador. Conseqüentemente haverá uma maior redução na amplitude do sinal de saída.

Por esta razão, sempre que se utilizar o gerador de sinais, o nível de saída deve ser ajustado com a carga conectada.

O nível do sinal de saída do gerador deve ser ajustado com a carga conectada.

CASAMENTO DE IMPEDÂNCIA

Para se obter a máxima transferência de potência gerador-carga, a impedância de saída do gerador deve ser a mais próxima possível da impedância da carga.

A **Fig.6** mostra uma situação ideal de casamento de impedância com máxima transferência de potência.

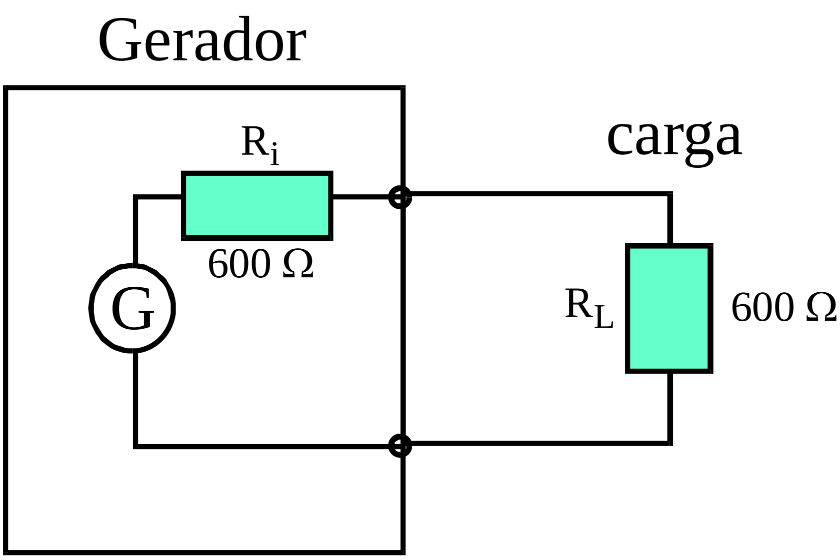


Fig.6 Casamento de impedância.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. O que é um gerador de funções ?
2. Quais as características de um gerador de funções ?

BIBLIOGRAFIAS

SENAI/DN. **Reparador de Circuitos Eletrônicos**, Eletrônica Básica I. Rio de Janeiro. (Coleção básica SENAI. Módulo 1).

ZBAR, PAUL B. **Instrumentos e medidas em eletrônica**; Práticas de Laboratório. Trad. Aracy Mendes da Costa. São Paulo, McGraw Hill, 1978, 229p.

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Educação Permanente – Torna-se um imperativo com o compromisso mútuo entre pessoas e entidade, em favor do crescimento pessoal, institucional e da sociedade.

Introdução

Uma das grandes dificuldades que os técnicos em manutenção encontram na reparação de circuitos eletrônicos reside no fato de que os fenômenos que ocorrem nos componentes são abstratos, ou seja, tudo acontece sem que se possa ver. Toda a reparação é feita com base em raciocínio, de forma abstrata.

Por essa razão, o osciloscópio é um instrumento valioso para técnicos. Através do osciloscópio, variações de tensão em um componente do circuito são transformadas em figuras em uma tela, possibilitando uma análise de seu comportamento.

Este fascículo, que é o primeiro a respeito do osciloscópio, tratará dos seus controles básicos e da preparação para o uso, visando a capacitá-lo a utilizar posteriormente o osciloscópio para os mais diversos tipos de medição e observação.

Para ter sucesso no desenvolvimento do conteúdo e atividades deste fascículo, o leitor deverá ter conhecimentos relativos a:

- Tensão elétrica.

Introdução ao osciloscópio

O osciloscópio é um equipamento que permite a observação de variações de tensão elétrica em forma de figuras em uma tela.

Através do osciloscópio pode-se realizar pesquisas e análises de defeitos em circuitos eletrônicos e elétricos.

As imagens na tela de um osciloscópio são formadas unicamente pelo movimento rápido de um ponto na direção horizontal e vertical, como num aparelho de televisão. As imagens formam-se na tela do osciloscópio através de movimentos simultâneos na direção vertical e horizontal.

O painel do osciloscópio e a função dos seus controles

A **Fig.1** apresenta um modelo de osciloscópio com o painel de controle e entradas de sinal.

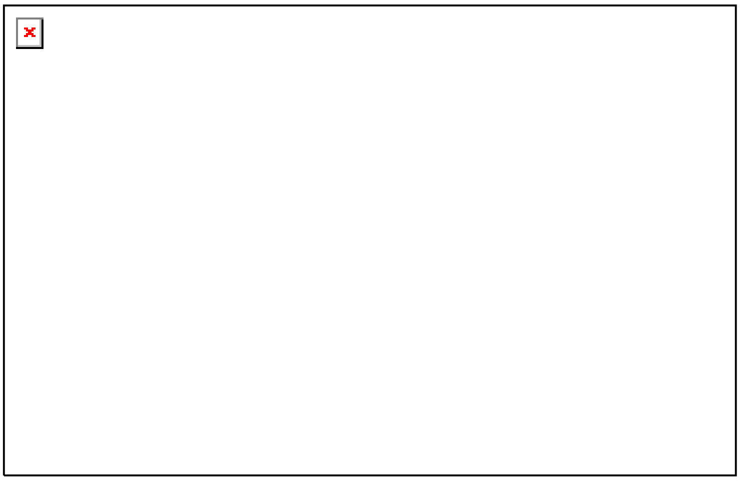


Fig.1 Osciloscópio.

Os controles e entradas do painel podem ser divididos em três grupos:

- Controles de ajuste do traço ou ponto na tela.
- Controles e entrada de atuação vertical.
- Controles e entrada de atuação horizontal.

CONTROLES DE AJUSTE DO TRAÇO OU PONTO NA TELA

A **Fig.2** destaca o grupo de controles de ajuste do traço ou ponto em um modelo de osciloscópio.

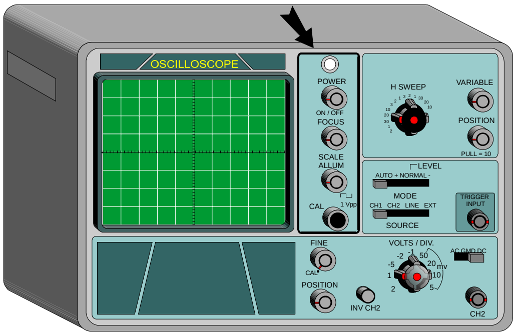


Fig.2 Grupo de ajuste do traço ou ponto.

Serão apresentadas, entre parênteses, as designações dos controles em inglês visto que é comum os osciloscópios apresentarem este tipo de identificação.

BRILHO OU LUMINOSIDADE (BRIGHTNESS OU INTENSITY)

É o controle que ajusta a luminosidade do ponto ou traço. Em alguns osciloscópios, este controle está acoplado à chave liga-desliga do equipamento. Deve-se evitar o uso de brilho excessivo, pois a tela do osciloscópio pode ser danificada.

FOCO (FOCUS)

É o controle que ajusta a nitidez do ponto ou traço luminoso. O foco deve ser ajustado de forma a se obter um traço fino e nítido na tela. Os ajustes de brilho e foco são ajustes básicos que são realizados sempre que se utiliza o osciloscópio.

ILUMINAÇÃO DA RETÍCULA (SCALE ILLUMINATION)

Permite iluminar as divisões traçadas na tela.

CONTROLES E ENTRADA DE ATUAÇÃO VERTICAL

A **Fig.3** destaca o grupo de controles de atuação vertical em um modelo de osciloscópio.

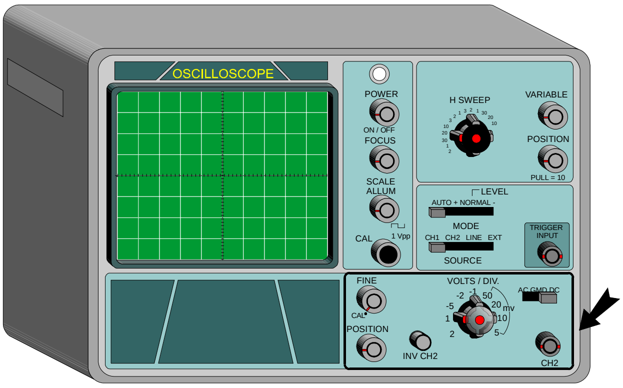


Fig.3 Grupo de controle e atuação vertical.

ENTRADA DE SINAL VERTICAL (INPUT)

Nesta entrada é conectada a ponta de prova do osciloscópio. As variações de tensão aplicadas nesta entrada aparecem sob forma de figuras na tela do osciloscópio, como pode ser visto na **Fig.4**.

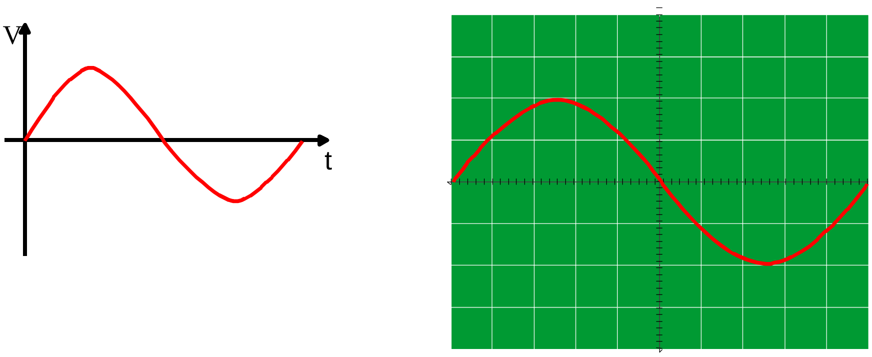


Fig.4 Sinal aplicado e imagem na tela.

CHAVE DE SELEÇÃO DO MODO DE ENTRADA (CA-CC OU AC-DC)

Esta chave é selecionada de acordo com o tipo de forma de onda a ser observada. Em alguns osciloscópios esta chave tem 3 posições (CA - 0 - CC ou CA - GND - CC). A posição adicional “0” ou “GND” é usada para a realização de ajustes do osciloscópio em algumas situações.

CHAVE SELETORA DE GANHO VERTICAL (V/GAIN OU V/DIV)

Através desta chave seletora é possível **aumentar ou diminuir a amplitude** de uma projeção na tela do osciloscópio. A **Fig.5** ilustra o que ocorre com a figura quando se movimenta esta chave seletora.

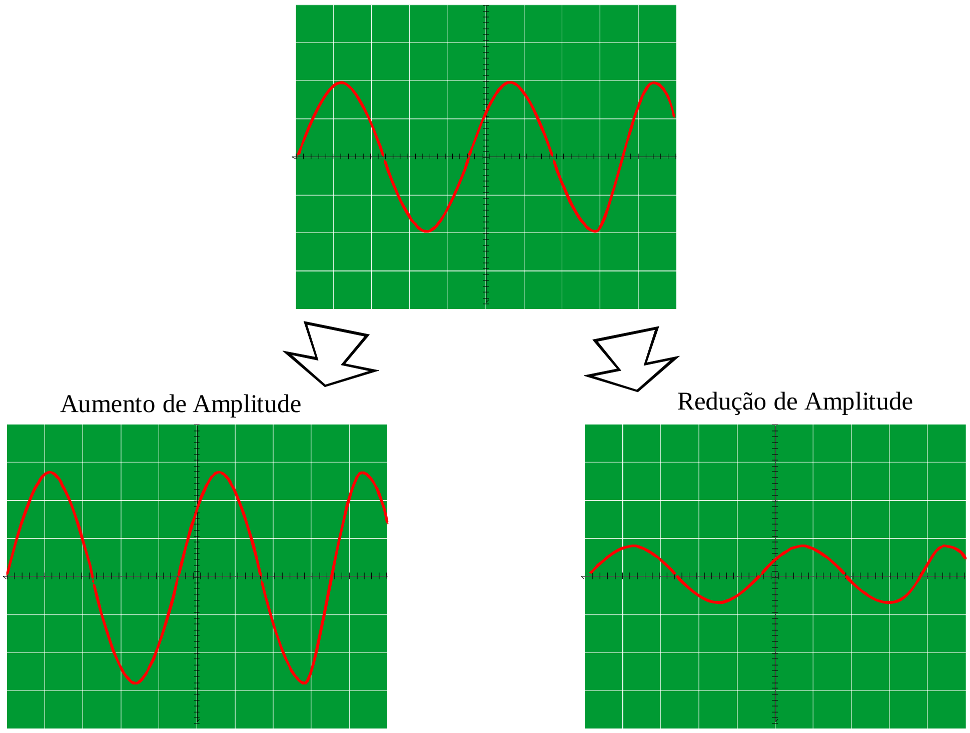


Fig.5 Aumento ou redução de amplitude através da chave seletora de ganho vertical.

AJUSTE FINO DE GANHO VERTICAL (FINE - VARIABLE OU VERNIER)

Tem a mesma função da chave seletora de ganho vertical: aumentar ou diminuir a amplitude da figura na tela. Enquanto a chave seletora provoca variações de amplitude em passos (proporções definidas), o ajuste fino permite variar linearmente a amplitude.

POSIÇÃO VERTICAL (POSITION)

Permite movimentar a projeção mais para cima ou para baixo na tela. A movimentação não interfere na forma da figura projetada na tela.

CONTROLES DE ATUAÇÃO HORIZONTAL

A **Fig.6** destaca os controles de atuação horizontal em um modelo de osciloscópio.

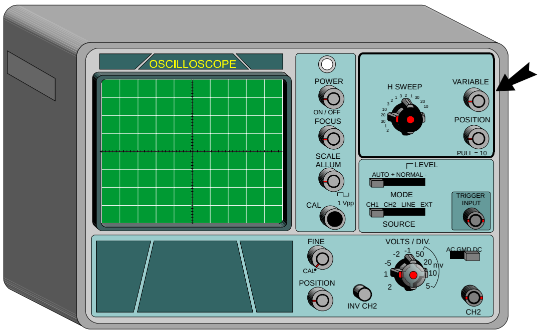


Fig.6 Grupo de controle de atuação horizontal.

CHAVE SELETORA NA BASE DE TEMPO (H. SWEEP)

É o controle que permite variar o tempo de deslocamento horizontal do ponto na tela.

Através deste controle, pode-se ampliar ou reduzir horizontalmente uma figura na tela.

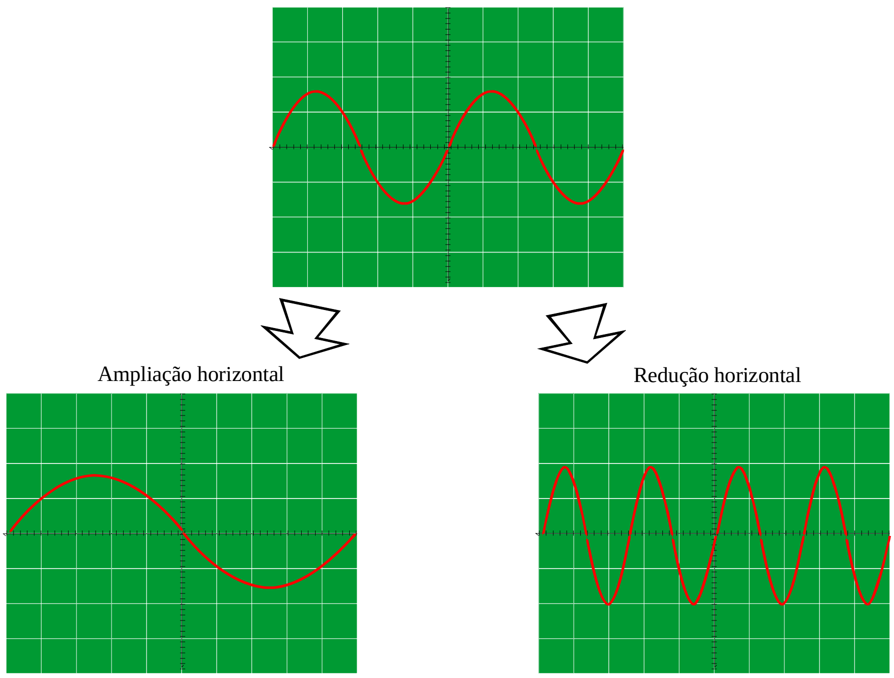


Fig.7 - Ampliação ou redução horizontal através da chave seletora de base de tempo.

Em alguns osciloscópios esta chave seletora tem uma posição identificada como EXT (externa) possibilitando que o deslocamento horizontal do ponto seja controlado por um circuito externo ao osciloscópio através de uma entrada específica. Quando a posição externa é selecionada, não há formação do traço na tela, obtendo-se apenas um ponto.

AJUSTE FINO (VARIABLE)

Este controle permite um ajuste mais preciso do tempo de deslocamento do ponto na tela. Atua em conjunto com a chave seletora da base de tempo.

POSIÇÃO HORIZONTAL (H. POSITION)

É o ajuste que permite centrar horizontalmente a forma de onda na tela. Girando o controle de posição horizontal para a direita, o traço se movimenta horizontalmente para a direita ou vice-versa.

CONTROLES E ENTRADA DE SINCRONISMO

São controles que permitem fixar a forma de onda na tela do osciloscópio. Estes controles são usados principalmente na observação de sinais alternados. A **Fig.8** destaca os controles de sincronismo.

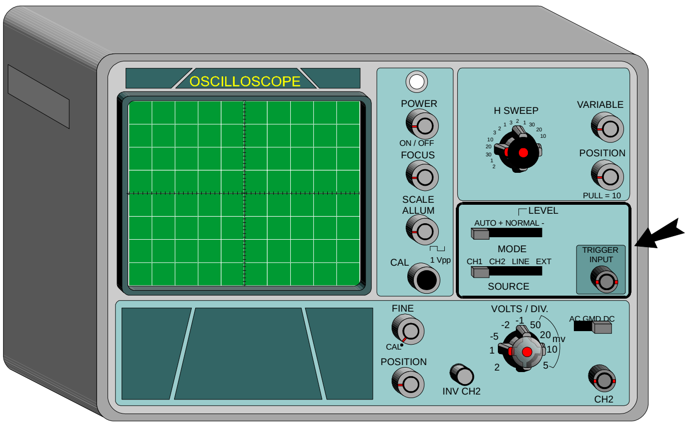


Fig.8 Grupo de controle de fixação da forma de onda na tela.

Estes controles são analisados por ocasião da utilização do osciloscópio na medição de tensão CA.

PONTAS DE PROVA

As pontas de prova são utilizadas para interligar o osciloscópio aos pontos de medição. A **Fig.9** mostra uma ponta de prova.

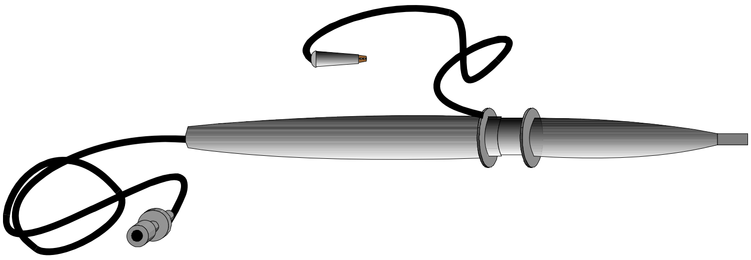


Fig.9 Ponta de prova.

Uma das extremidades da ponta de prova é conectada a uma das entradas do osciloscópio através de um conector e a extremidade livre serve para conexão aos pontos de medição.

A extremidade livre tem uma garra jacaré, denominada de terra da ponta de prova, que deve ser conectada ao terra do circuito e uma ponta de entrada de sinal que deve ser conectada no ponto que se deseja medir.

Existem dois tipos de pontas de prova:

- Ponta de prova 1:1.
- Ponta de prova 10:1.

A ponta de prova 1:1 se caracteriza por aplicar à entrada do osciloscópio a mesma tensão ou forma de onda que é aplicada à ponta de medição, como ilustrado na **Fig.10**.

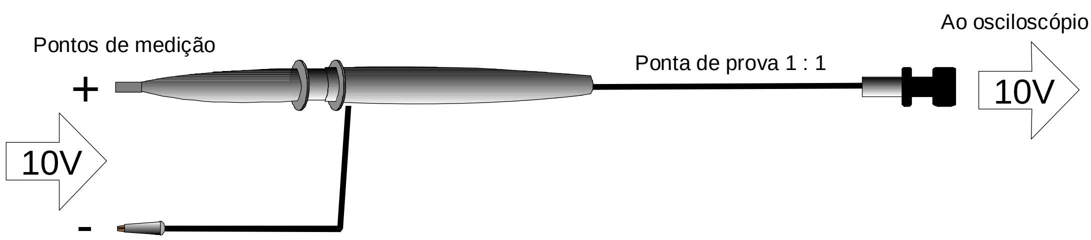


Fig.10 Ponta de prova 1:1.

A ponta de prova 10:1 é divisora de tensão, entregando ao osciloscópio a décima parte da tensão aplicada à ponta de medição, como pode ser visto na **Fig.11**.

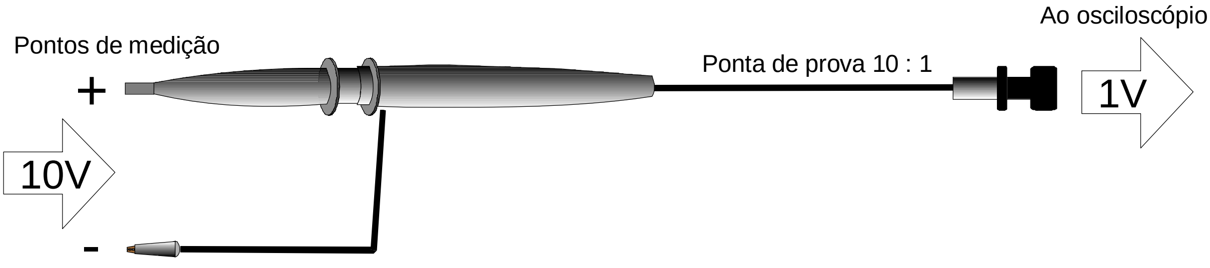


Fig.11 Ponta de prova 10:1.

As pontas de prova 10:1 são usadas para permitir que o osciloscópio seja utilizado para medições ou observações de sinais com tensões ou amplitudes 10 vezes maiores que o seu limite de medição normal.

Por exemplo, um osciloscópio que permite a leitura de tensões de até 50V com ponta de prova 1:1 pode ser utilizado em tensões de até 500V com uma ponta de prova 10:1. Existem pontas de prova que dispõem de um botão através do qual se pode selecionar a opção 10:1 ou 1:1, conforme mostrado na **Fig.12**.

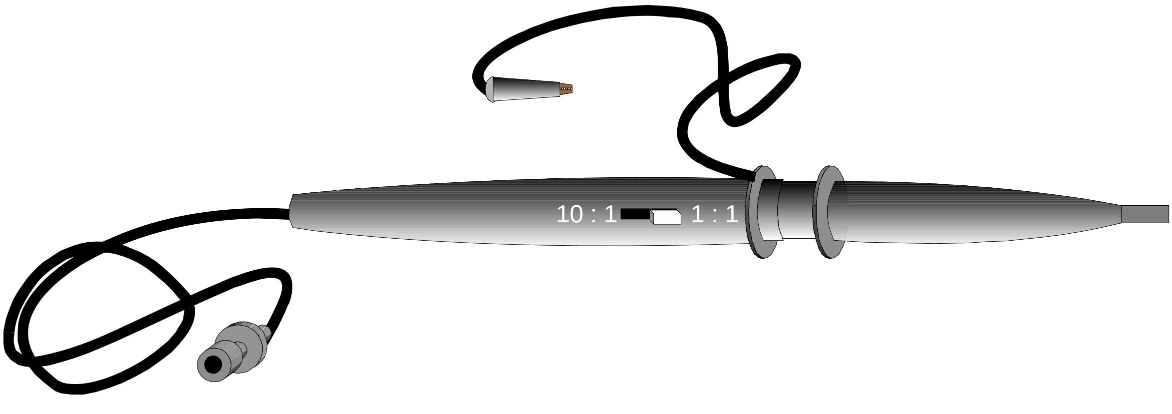


Fig.12 Ponta de prova com opção de seleção 1:1 e 10:1.

OSCILOSCÓPIOS DE DUPLO TRAÇO

Existem osciloscópios que permitem a visualização simultânea de dois sinais na tela. Estes osciloscópios são denominados de osciloscópios de duplo traço. A **Fig.13** mostra um osciloscópio deste tipo.

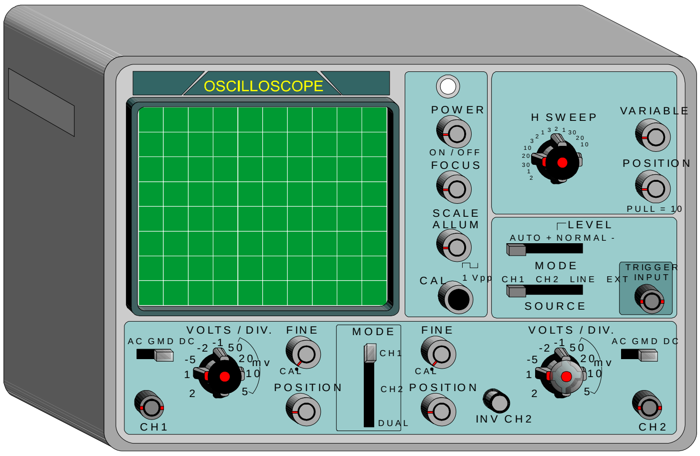


Fig.13 Osciloscópio de duplo traço.

Estes osciloscópios têm alguns controles que são comuns aos dois traços e outros que são individuais para cada traço. Estes controles são :

- Controles básicos (brilho, foco).
- Controles do horizontal (base de tempo e posição).

A **Fig.14** destaca os controles que são comuns aos dois traços em um modelo de osciloscópio.

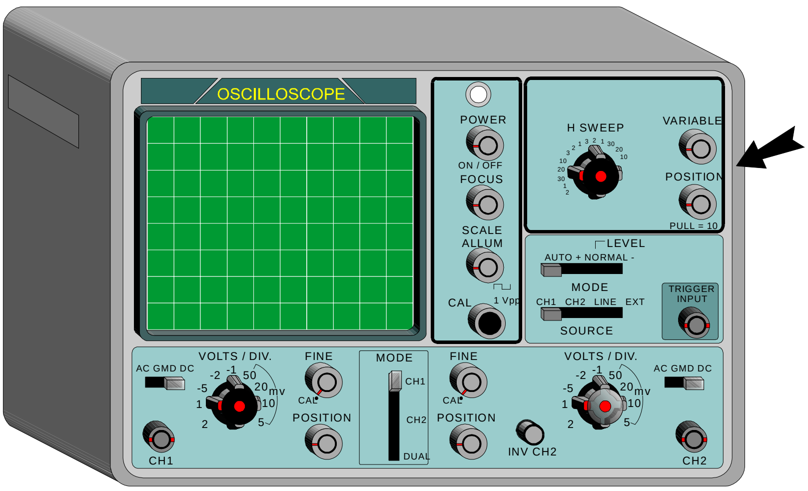


Fig.14 Controles comuns aos dois traços em osciloscópio de duplo traço.

A diferença entre os osciloscópios de traço simples e traço duplo situam-se basicamente no seguinte :

- Nas entradas e controles do vertical.
- Nos controles e entrada de sincronismo.

ENTRADAS E CONTROLES DO VERTICAL

A figura na tela do osciloscópio é uma projeção da tensão aplicada à entrada vertical. Conseqüentemente, para observar dois sinais simultaneamente é necessário aplicar duas tensões em duas entradas verticais.

Os osciloscópios de duplo traço dispõem de dois grupos de controles verticais:

- Um grupo para o CANAL A ou CANAL 1.
- Um grupo para o CANAL B ou CANAL 2.

Cada canal vertical controla um dos sinais na tela (amplitude e posição vertical).

A **Fig.15** destaca os grupos de controles do canal 1 (CH1) e canal 2 (CH2).

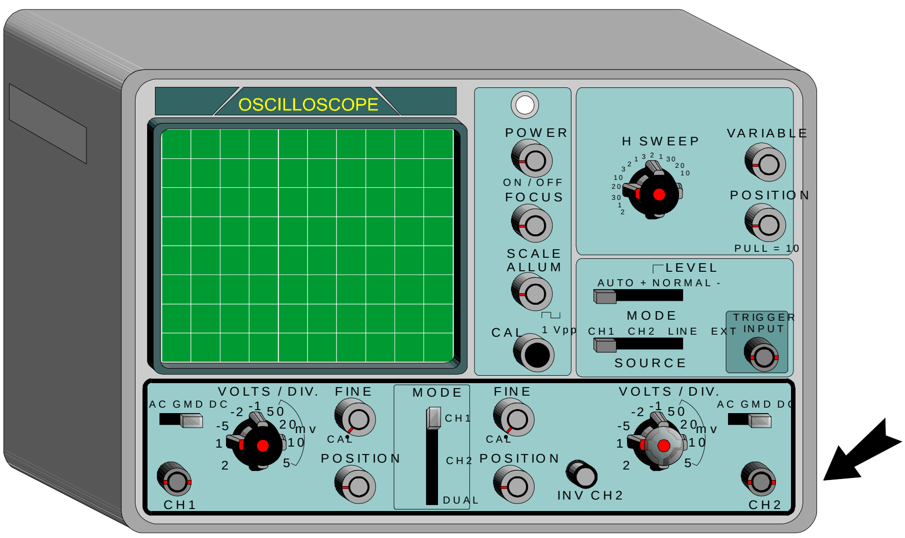


Fig.15 Detalhes do grupo de controle dos canais 1 e 2.

Os grupos de controle verticais dos canais geralmente são iguais como ilustrado na **Fig.16**. Cada canal dispõe de:

- Entrada vertical (1A e 2A).
- Chave seletora CA-0-CC (1B e 2B).
- Chave seletora de ganho vertical (1C e 2C).
- Ajuste fino de ganho vertical (1D e 2D).
- Posição vertical (1E e 2E).

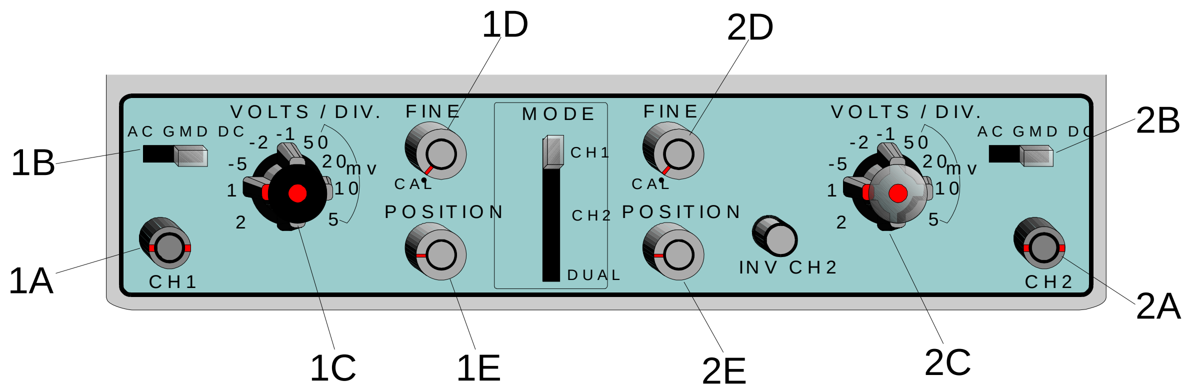


Fig.16 Grupo de Controle Vertical dos Canais.

Alguns osciloscópios dispõem ainda de um controle denominado de INVERSOR (INVERT) que permite inverter a figura na tela, como pode ser visto na **Fig. 17**.

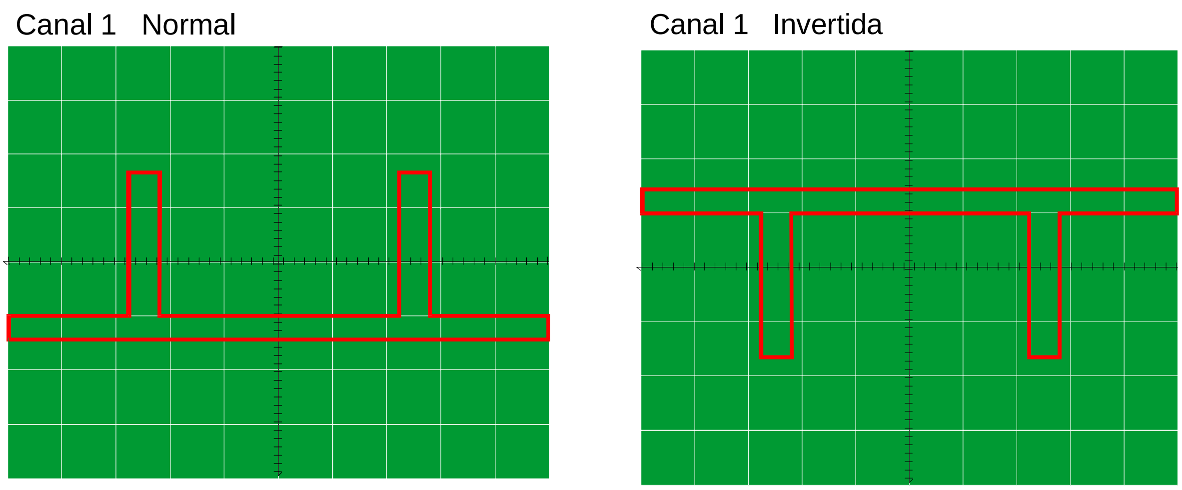


Fig.17 Ação do botão INVERSOR.

Um osciloscópio de duplo traço pode ser utilizado como se fosse de traço simples. Tanto o canal 1 como o canal 2 podem ser utilizados individualmente.

Entre os grupos de controles verticais do canal 1 e 2 existe uma chave seletora que permite que se determinem quantos e quais os canais que aparecerão na tela. Esta chave tem pelo menos três posições: CH1, CH2 e DUAL (ou chopper).

Na posição CH1 aparecerá apenas um traço na tela, projetando o sinal que estiver aplicado à entrada vertical do canal 1.

Na posição CH2 aparecerá apenas um traço na tela, projetando o sinal aplicado à entrada vertical do canal 2.

Na posição DUAL (chopper) aparecerão na tela dois traços, cada um representando o sinal aplicado a uma das entradas.

Em osciloscópios mais sofisticados, esta chave pode ter mais posições que permitem outras alternativas de funcionamento.

CONTROLES DE SINCRONISMO

Os controles de sincronismo têm por função fixar a imagem na tela. A **Fig.18** destaca o grupo de controles de sincronismo.

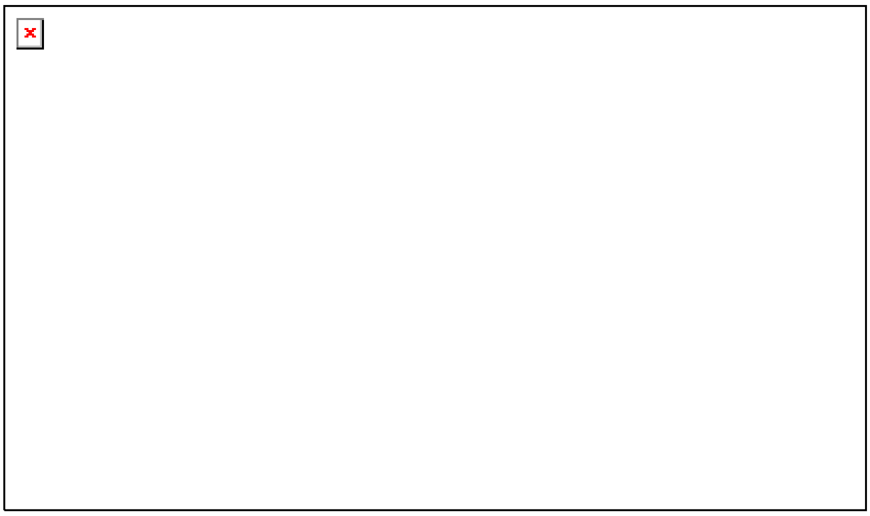


Fig.18 Grupo de controle de sincronismo.

Os controles de sincronismo são:

- Chave seletora de fonte de sincronismo.
- Chave seletora de modo de sincronismo.
- Controle de nível de sincronismo.
- Entrada de sincronismo.

Estes controles serão analisados detalhadamente por ocasião da medição de tensão alternada com o osciloscópio.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Qual a utilidade de um osciloscópio ?

2. Quais são os controles de ajuste do traço ou ponto na tela ?

3. Quais são os controles de atuação horizontal ?

4. O que se entende por um ponta de prova 10:1 ?

BIBLIOGRAFIA

SENAI/DN. **Reparador de Circuitos Eletrônicos**; Eletrônica Básica I. Rio de Janeiro. (coleção básica SENAI. Módulo 1).

ZBAR, PAUL B. **Instrumentos e medidas em eletrônica**, Práticas de Laboratório. Trad. Aracy Mendes da Costa. São Paulo, McGraw Hill, 1978, 22p.

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Adequar a formação profissional que ministra em suas diversas modalidades, notadamente a aprendizagem, às novas demandas do desenvolvimento da indústria e das demais empresas de categoria econômicas sob sua jurisdição, é uma diretriz do *SENAI*.

Introdução

O osciloscópio é um instrumento de grande versatilidade, largamente utilizado na reparação de circuitos eletrônicos.

Através do osciloscópio pode-se executar a medição de diversas grandezas elétricas.

Este fascículo foi elaborado visando a capacitá-lo a executar medições de tensão com o osciloscópio, abordando todos os conhecimentos e procedimentos necessários para a execução correta destas medições.

Para ter sucesso no desenvolvimento do conteúdo e atividades deste fascículo, o leitor deverá ter conhecimentos relativos a:

- Ajustes básicos do osciloscópio.
- Medição de tensão contínua.
- Medição de tensão alternada.

Medição de tensão contínua

Antes de se proceder à medição de uma tensão CC com o osciloscópio, deve-se realizar uma preparação que pode ser divida em três etapas. São elas:

- Ajuste da referência.
- Seleção do modo de entrada.
- Conexão da ponta de prova ao osciloscópio.

AJUSTE DA REFERÊNCIA

Quando o osciloscópio é utilizado para a medição de tensões contínuas, faz-se necessário estabelecer uma posição para o traço na tela que servirá de posição de referência.

O traço deve ser posicionado sobre uma das divisões do reticulado da tela, utilizando o controle de posição vertical do canal selecionado, como mostrado na **Fig.1**.

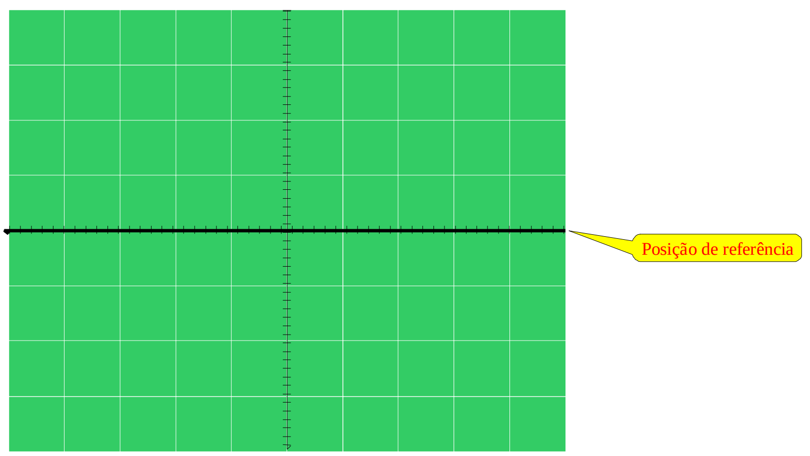


Fig.1 Posicionamento do traço de referência na tela.

Para realizar o ajuste da posição de referência do traço, deve-se proceder da seguinte forma:

1. Colocar a chave seletora de modo de entrada (CA-0-CC) do canal escolhido na posição 0.

2. Ajustar a posição do traço na tela usando o controle de posição vertical deste canal.

A posição ideal do operador em relação ao aparelho para realizar o ajuste é frontal à tela, conforme ilustrado na **Fig.2**.



Fig.2 Posição correta do operador para a realização do ajuste do traço na tela.

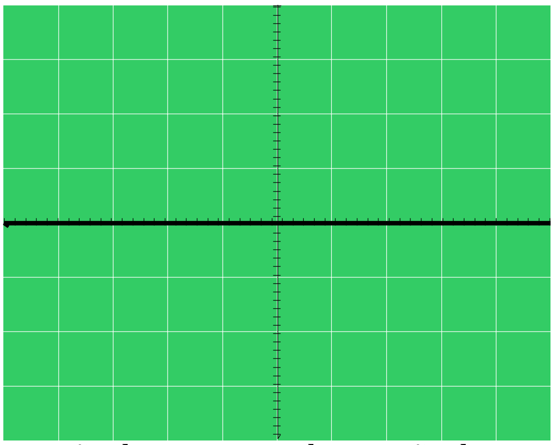
SELEÇÃO CA-CC E CONEXÃO DA PONTA DE PROVA

Para medição de tensão contínua, a chave seletora de modo de entrada (CA-0-CC) do canal escolhido deve ser posicionada para CC após o ajuste da referência.

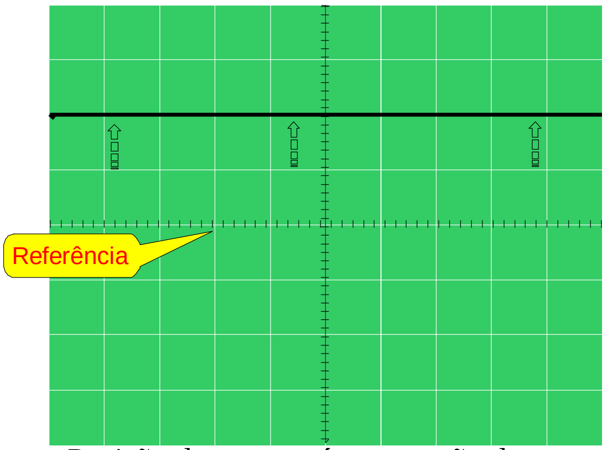
A ponta de prova é então conectada na entrada vertical do canal escolhido.

Após a preparação do osciloscópio, as extremidades da ponta de prova podem ser conectadas nos pontos onde está presente a tensão a ser medida.

Quando as extremidades livres da ponta de prova são conectadas aos pontos de medição, o traço muda de posição na tela, como pode ser visto na **Fig.3**.



Posição do traço antes da conexão da ponta de prova aos pontos de medição



Posição do traço após a conexão da ponta de prova aos pontos de medição

Fig.3 Mudança da posição do traço na tela após conexão das pontas de prova aos pontos de medição.

INTERPRETAÇÃO DA MEDIÇÃO

A determinação do valor de tensão aplicada na entrada é feita em duas etapas:

1. Verifica-se de quantas divisões foi a mudança de posição do traço na tela (em relação à posição de referência).

A **Fig.4** mostra um exemplo de mudança de posição de traço de duas divisões.

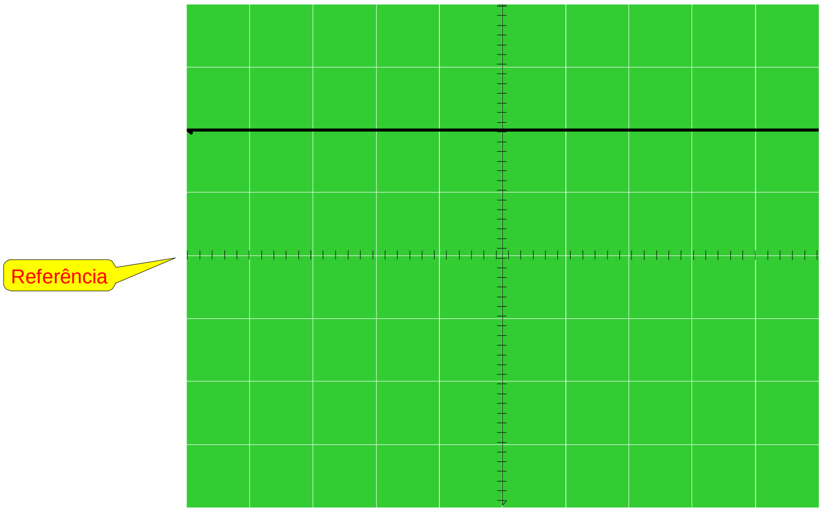


Fig.4 Mudança do traço da tela de duas divisões.

2) Multiplica-se o número de divisões obtidos na primeira etapa pelo valor indicado pela chave seletora de ganho vertical do canal, que é a chave que indica o valor de cada divisão.

A **Fig.5** mostra, por exemplo, uma mudança de posição do traço na tela de 3 divisões e a chave seletora de ganho vertical na posição 5V/divisão. Logo, a tensão CC medida é de 15V.

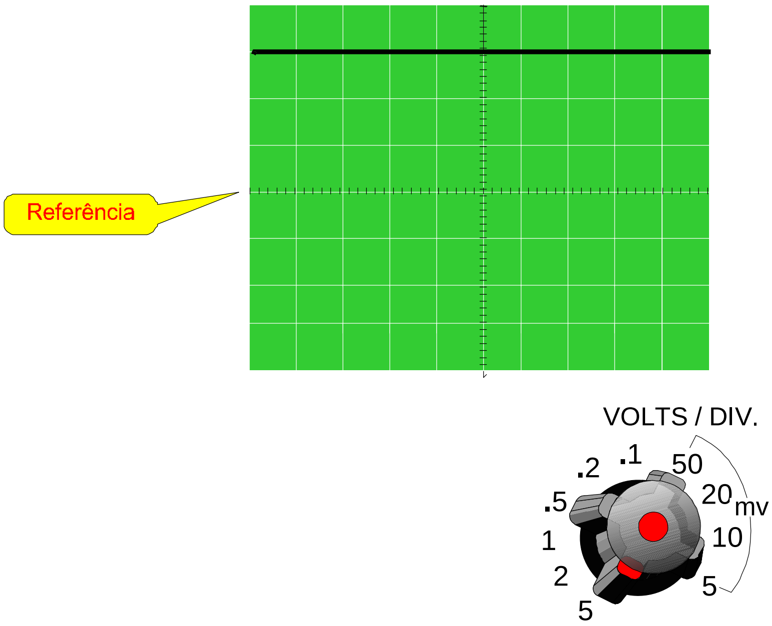


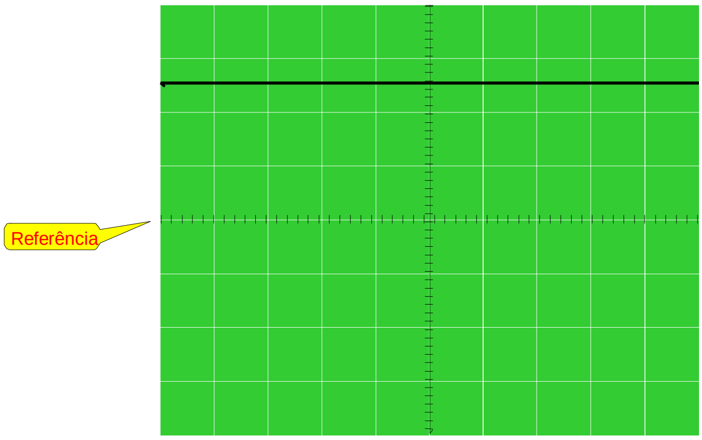
Fig.5 Traço em 3 divisões na tela.

INTERPRETAÇÃO DA MEDIÇÃO

Determina-se de quantas divisões foi a mudança de posição no traço da tela. Este número de divisões multiplicado pelo valor indicado pela chave seletora de ganho vertical fornece a tensão existente entre os pontos medidos.

Pelo fato de permitir a medição de tensões, o eixo vertical da tela do osciloscópio é denominado de eixo das tensões.

Para facilitar a leitura, o eixo vertical central é dividido em subdivisões. A **Fig.6** mostra um traço situada a 2,4 divisões da posição de referência e a chave seletora de ganho vertical na posição 2V/divisão. Neste caso, a tensão contínua medida é de 4,8V.



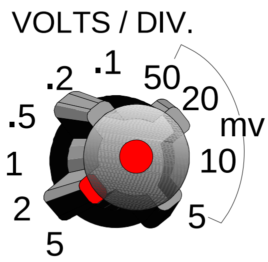


Fig.6 Traço numa posição intermediária.

O valor da tensão correspondente a cada divisão da tela é definido pela chave seletora de ganho vertical.

Através do posicionamento da chave seletora de ganho vertical, o osciloscópio pode ser utilizado para medições de valores de tensão desde alguns milivolts até dezenas de volts.

TENSÕES CONTÍNUAS POSITIVAS E NEGATIVAS

Os circuitos eletrônicos podem utilizar o terra conectado ao pólo negativo ou positivo da fonte de alimentação.

Dependendo do terra, as tensões CC medidas em um circuito podem ser positivas ou negativas.

O osciloscópio pode ser utilizado tanto para medições de tensões positivas como negativas.

Para que a medição seja correta, a garra, que é o terra da ponta de prova do osciloscópio, deve ser ligado ao terra do circuito, seja ele positivo ou negativo.

O terminal de terra da ponta de prova do osciloscópio sempre é conectado ao terra do circuito, seja ele positivo ou negativo.

Quando a tensão aplicada na entrada vertical é positiva, o traço se desloca da posição de referência para cima, como ilustrado na **Fig.7**.

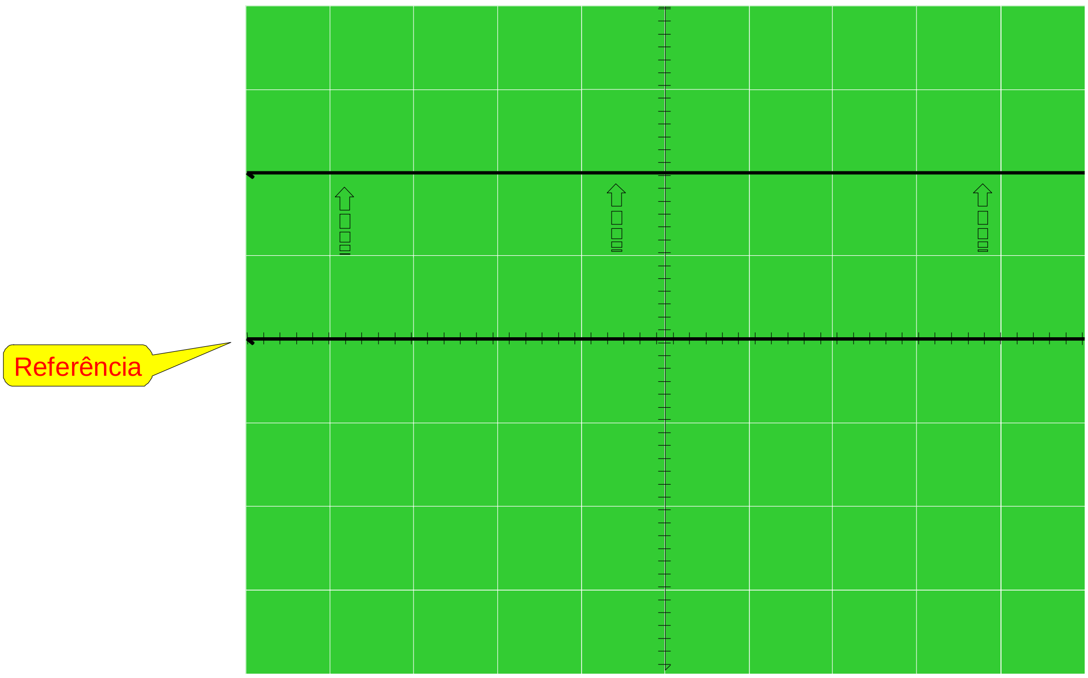


Fig.7 Posição da linha para uma tensão de entrada positiva.

Quando a tensão aplicada na entrada vertical é negativa, o traço se desloca da posição de referência para baixo, como mostrado na **Fig.8**.

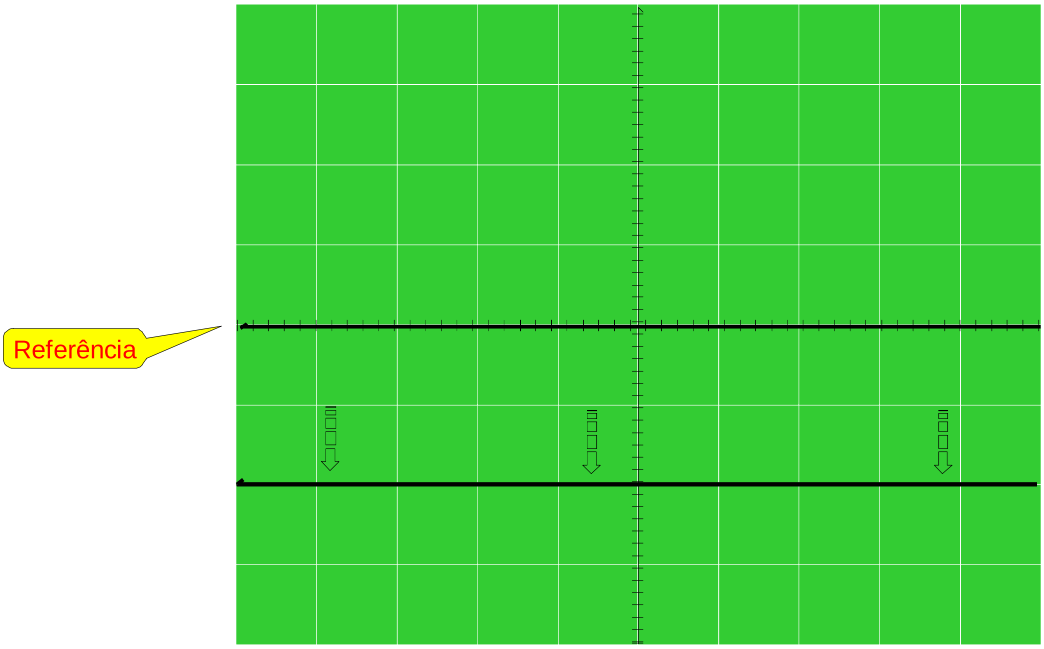


Fig.8 Posição da linha para uma tensão de entrada negativa.

A interpretação dos valores das tensões negativas é feita da mesma forma que a das positivas.

CHAVE SELETORA DE GANHO VERTICAL

A chave seletora de ganho vertical estabelece a quantos volts corresponde cada divisão vertical da tela.

Em todos os osciloscópios, esta chave seletora tem muitas posições, de forma que se possa fazer com que cada divisão da tela tenha valores que vão, por exemplo, desde 5mV até 5V, como mostra o exemplo da **Fig.9**.

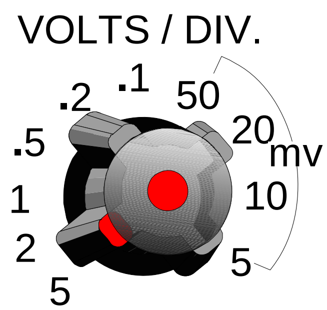


Fig.9 Exemplo de chave seletora.

Em cada posição da chave seletora, o osciloscópio tem um limite de medição.

Por exemplo, com 8 divisões verticais na tela, selecionando a chave seletora para a posição 10V/divisão, pode-se medir tensões de até 80V.

Se a tensão aplicada na entrada vertical exceder o limite de medição, o traço sofre um deslocamento tal que ele desaparece totalmente da tela.

Quando isso acontece, deve-se mudar a posição da chave seletora de ganho vertical para um valor maior, reajustar a referência e refazer a medição.

Quando o valor de tensão a ser medido é conhecido aproximadamente, a chave seletora de ganho vertical deve ser posicionada adequadamente antes de realizar a medição.

É importante lembrar que cada vez que a posição da chave seletora de ganho vertical for modificada, deve-se conferir a referência e se necessário reajustá-la.

A posição de referência do traço na tela deve ser conferida a cada mudança de posição da chave seletora de ganho vertical e reajustada, se necessário.

AJUSTE FINO DE GANHO VERTICAL

Quando o osciloscópio dispõe de um ajuste fino de ganho vertical, este deve ser calibrado, **antes de executar a medição,** caso contrário a leitura não será correta.



O ajuste fino de ganho vertical deve ser calibrado antes da execução de medição de tensão com o osciloscópio.

Em alguns osciloscópios, o ajuste fino de ganho vertical já tem a posição de calibração indicada, como mostra o exemplo da **Fig.10**.

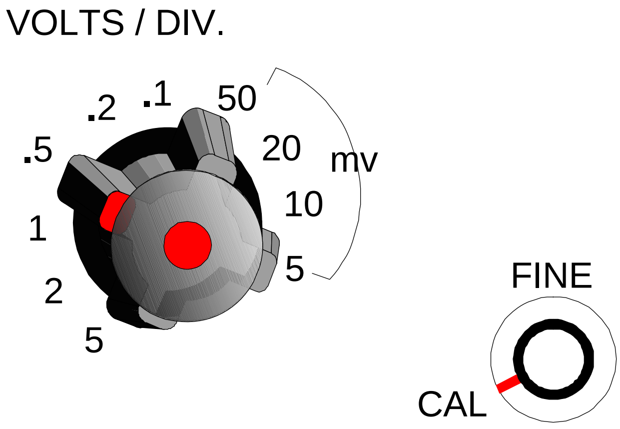


Fig.10 Indicação da posição de calibração no botão de ajuste fino.

Neste caso, antes de realizar a medição, o botão é colocado nesta posição.

Quando o botão de ajuste fino não tiver posição de calibração indicada, o ajuste é feito utilizando-se uma tensão CC (ou CA quadrada) que está disponível em um borne do painel do osciloscópio, como pode ser visto na **Fig.11**.



Fig.11 Bornes para calibração**.**

O procedimento de calibração é o seguinte: conecta-se a ponta de prova (extremidade livre) ao borne e ajusta-se o controle de ajuste fino de forma que a tensão lida na tela coincida com a tensão (CC ou CA) indicada ao lado do borne.

Medição de tensão alternada

O osciloscópio pode ser utilizado como recurso para realização de uma medição de tensão alternada.

Este tipo de medição através do osciloscópio é muito comum nos reparos e manutenção em equipamentos eletrônicos.

PROCESSO DE MEDIÇÃO DE TENSÃO CA

O processo de medição de tensão CA com osciloscópio pode ser dividido em três etapas:

- Obtenção da forma de onda CA na tela.
- Sincronismo da projeção.
- Interpretação da medição.

OBTENÇÃO DA FORMA DE ONDA CA NA TELA

Considerando um osciloscópio que já esteja com um traço selecionado (CH1 ou CH2) e ajustado em brilho e foco, a projeção de CA na tela exige ainda:

- a seleção do modo de entrada.
- a conexão da ponta de prova do osciloscópio.
- a conexão da ponta de prova aos pontos de medição.

Seleção de modo de entrada

Para medições de tensões alternadas esta chave pode ser posicionada em "CA" ou "CC".

Conexão da ponta de prova ao osciloscópio

A ponta de prova é conectada à entrada vertical do canal selecionado. Em osciloscópios que tenham ajuste fino de ganho vertical, deve-se proceder a sua calibração antes da execução de medição.

Conexão da ponta de prova aos pontos de medição

Após o posicionamento dos controles, as pontas de prova são conectadas aos pontos de medição.

Quando as pontas de prova são conectadas aos pontos de medição, a tensão CA presente nesses pontos é projetada em forma de figura na tela do osciloscópio. Normalmente a figura está fora de sincronismo, como pode ser visto na **Fig.12**.

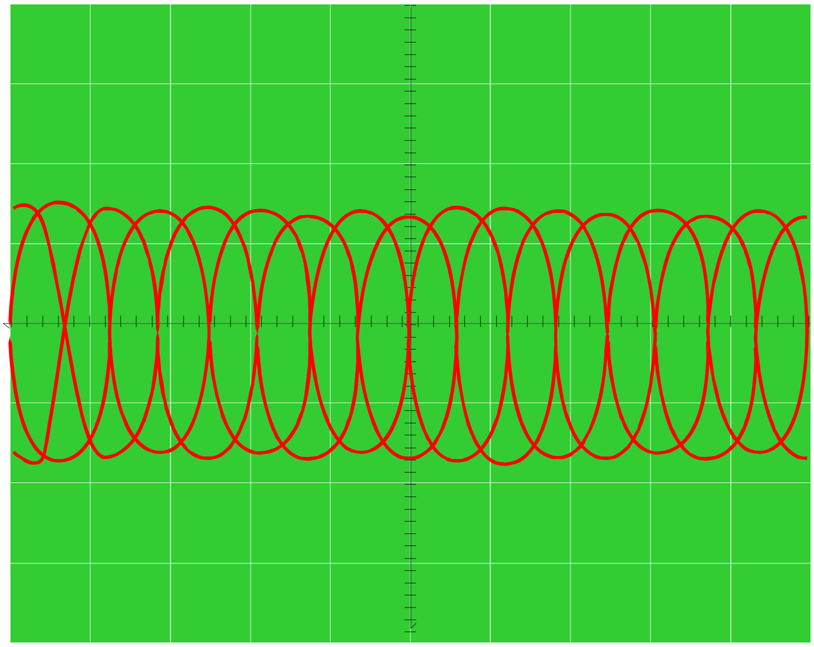


Fig.12 Tela com forma de onda fora de sincronismo.

Caso a figura exceda os limites da tela na vertical, deve-se atuar na chave seletora de ganho vertical de forma a obter-se o máximo de amplitude dentro dos limites da tela.

Da mesma forma, se a figura tiver uma amplitude muito pequena, atua-se na chave seletora de ganho vertical para obter-se uma figura com maior amplitude.

Sincronismo da projeção

O sincronismo consiste na fixação da imagem na tela para facilitar a observação.

A fixação da imagem é feita através dos controles de sincronismo do osciloscópio.

A **Fig.13** destaca o grupo de controles de sincronismo.

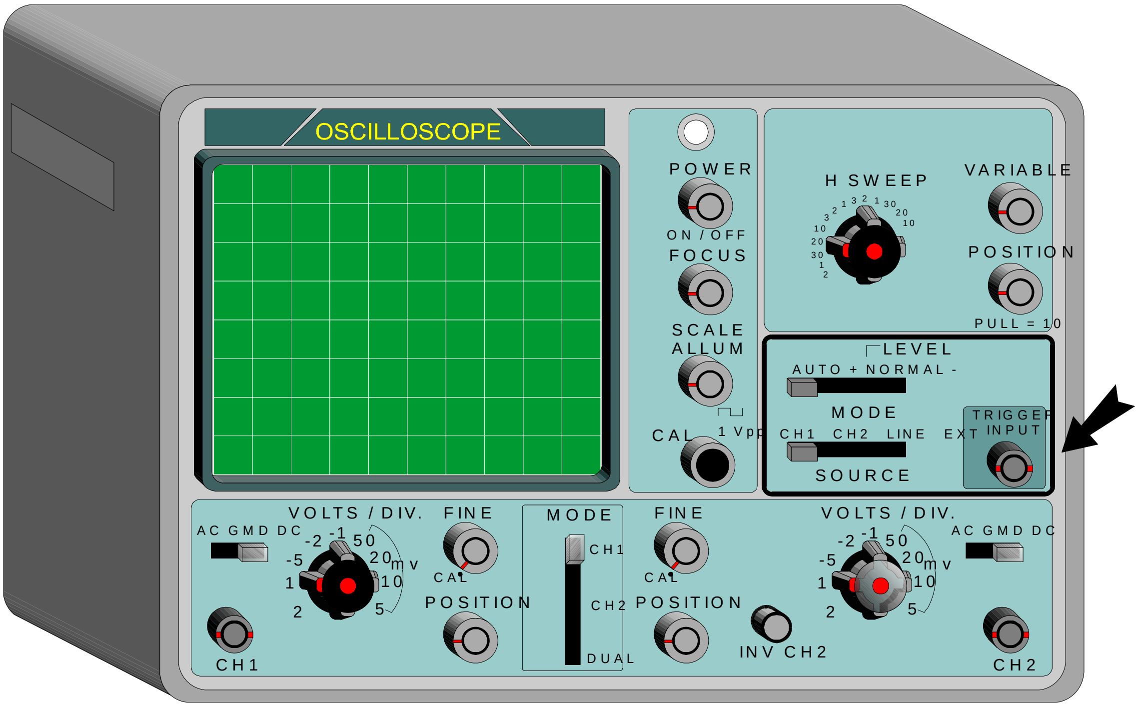


Fig.13 Controles de sincronismo.

Os controles de sincronismo são:

- Chave seletora de fonte de sincronismo.
- Chave de modo de sincronismo.
- Controle de nível de sincronismo.

Chave seletora de fonte (Source)

Selecionada onde será tomado o sinal de sincronismo necessário para fixar a imagem na tela do osciloscópio.

Esta chave seletora normalmente tem 4 posições, como pode ser visto na **Fig.14**.

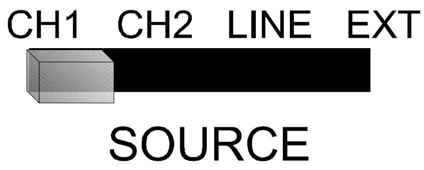


Fig.14 Posições de uma chave seletora.

Posição CH1: o sincronismo é controlado pelo sinal aplicado ao canal 1.

Posição CH2: o sincronismo é controlado pelo sinal aplicado ao canal 2.

Sempre que se usa o osciloscópio traço duplo como traço simples, usando apenas um canal, a chave seletora deve ser posicionada para o canal utilizado (CH1 ou CH2).

REDE

Realiza o sincronismo com base na freqüência da rede de alimentação do osciloscópio (senoidal 60Hz). Nesta posição, consegue-se facilmente sincronizar na tela sinais aplicados na entrada vertical que sejam obtidos a partir da rede elétrica.

EXTERNO

Na posição “externo”, o sincronismo da figura é obtido a partir de outro equipamento externo conectado ao osciloscópio.

O sinal que controla o sincronismo na posição “externo” é aplicado à entrada de sincronismo, conforme ilustrado na **Fig.15**.

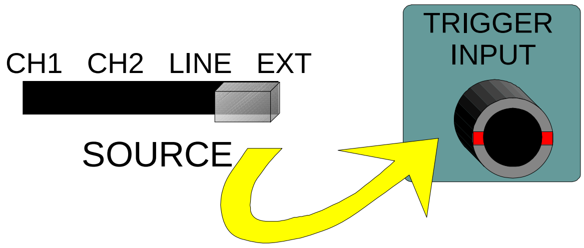


Fig.15 Chave de sincronismo na posição EXT.

Chave de modo de sincronismo (Mode)

Normalmente esta chave tem duas ou três posições : AUTO, NORMAL+, NORMAL-

AUTO : Nesta posição, o osciloscópio realiza o sincronismo da projeção automaticamente, com base no sinal selecionado pela chave seletora de fonte de sincronismo.

NORMAL+, NORMAL- : Nestas posições, o sincronismo é ajustado manualmente através do controle de nível de sincronismo (LEVEL).

Na posição NORMAL+, o sincronismo é positivo, fazendo com que o primeiro pico que apareça na tela seja o positivo, como ilustrado na **Fig.16**.

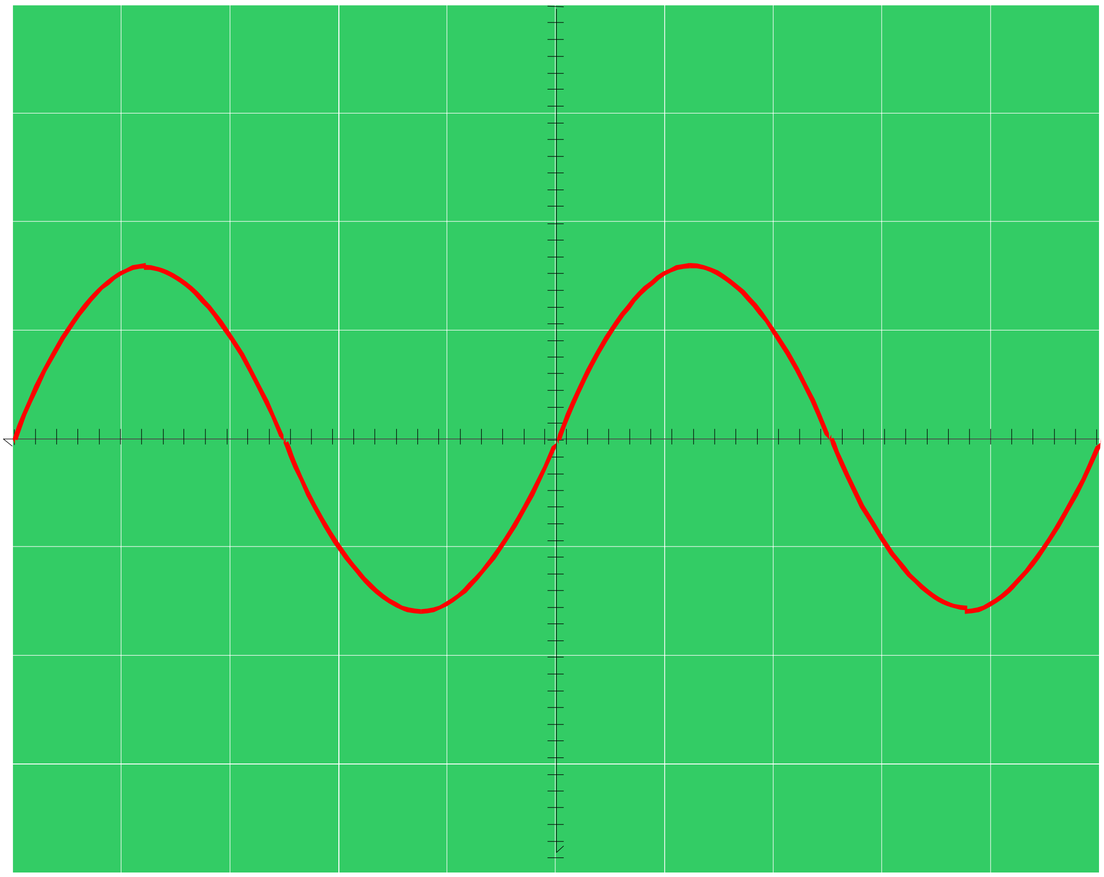


Fig.16 Na posição NORMAL+.

Na posição NORMAL- o sincronismo é negativo, como mostrado na **Fig.17**.

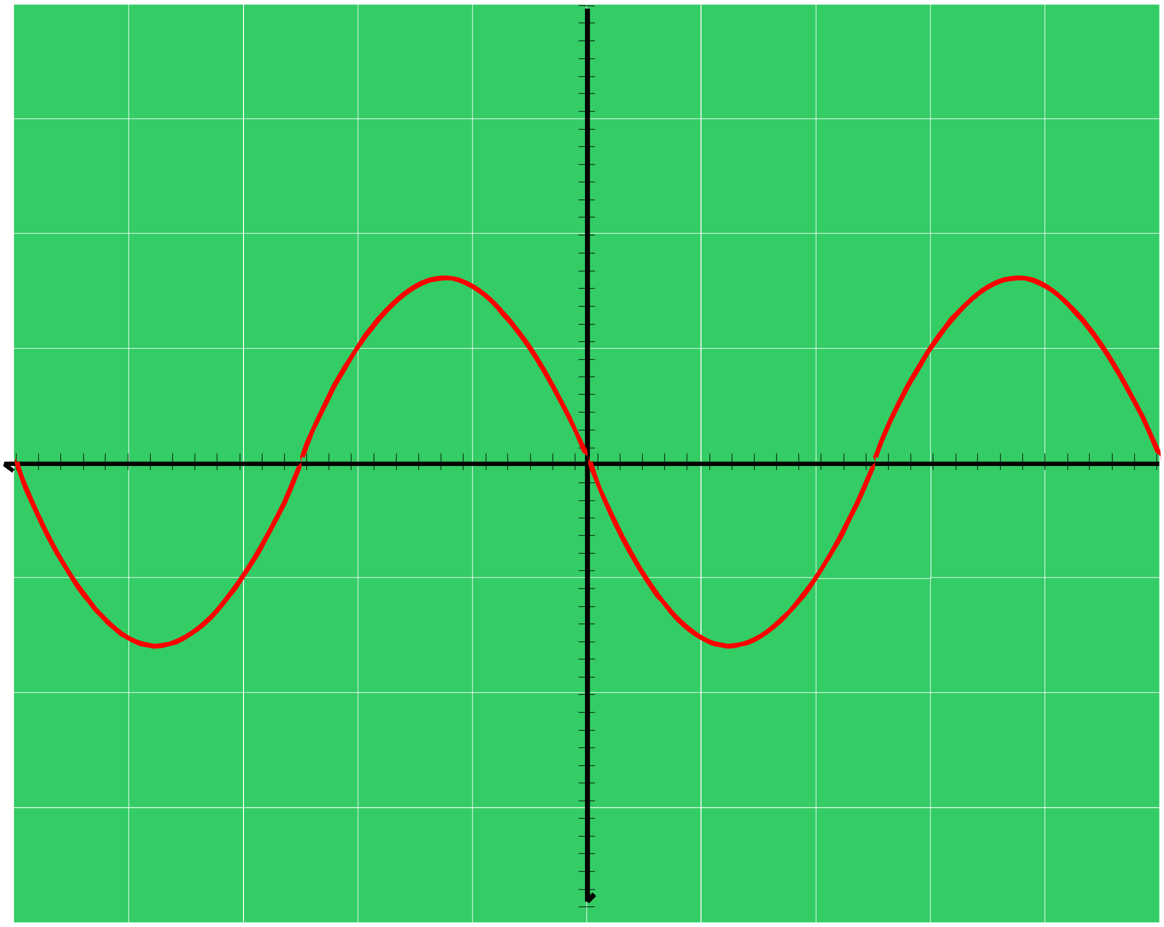


Fig.17 Na posição NORMAL **-** .

Para realizar a leitura de tensão é necessário sincronizar a figura. Em geral, posicionando a chave de modo de sincronismo para AUTO o osciloscópio fixa automaticamente a figura na tela.

Se na posição AUTO não houver sincronismo, deve-se passar para NORMAL e sincronizar com auxílio do controle de nível.

INTERPRETAÇÃO DA MEDIÇÃO

A leitura de tensão alternada aplicada na entrada vertical no osciloscópio é feita através da determinação de tensão de pico a pico da figura projetada na tela.

Verifica-se o número de divisões verticais ocupados pela figura e multiplica-se pelo valor indicado pela chave seletora de ganho vertical, conforme ilustrado na **Fig.18**.

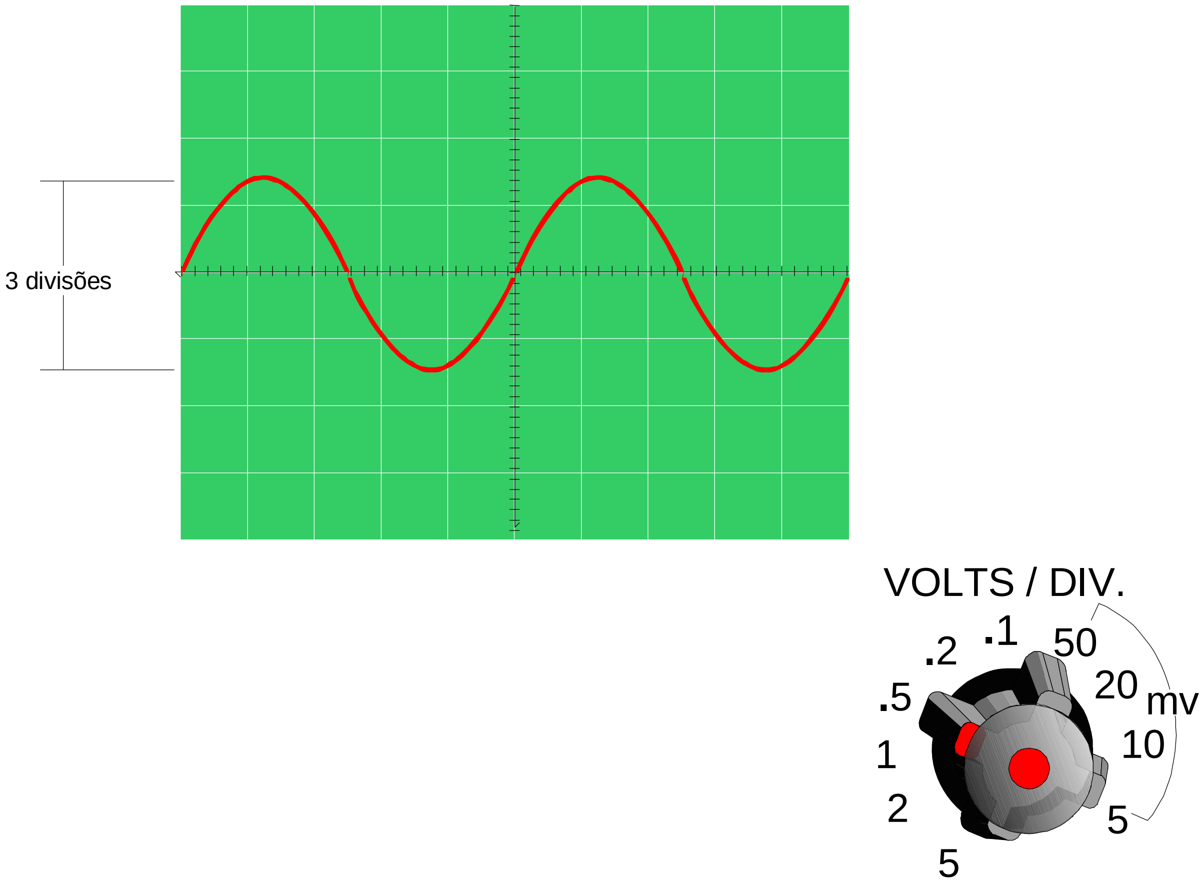


Fig.18 Interpretação da medição.

Quando o osciloscópio dispõe de um ajuste fino de ganho vertical, este deve ser calibrado antes da execução da medição.

POSICIONAMENTO ADEQUADO PARA A LEITURA

Com o objetivo de tornar mais fácil e precisa a leitura do número de divisões ocupadas na tela, pode-se movimentar verticalmente a figura, usando o controle de posição vertical.

Este procedimento permite posicionar um dos picos da CA sobre uma linha de referência sem modificar a sua amplitude, como mostrado na **Fig.19**.

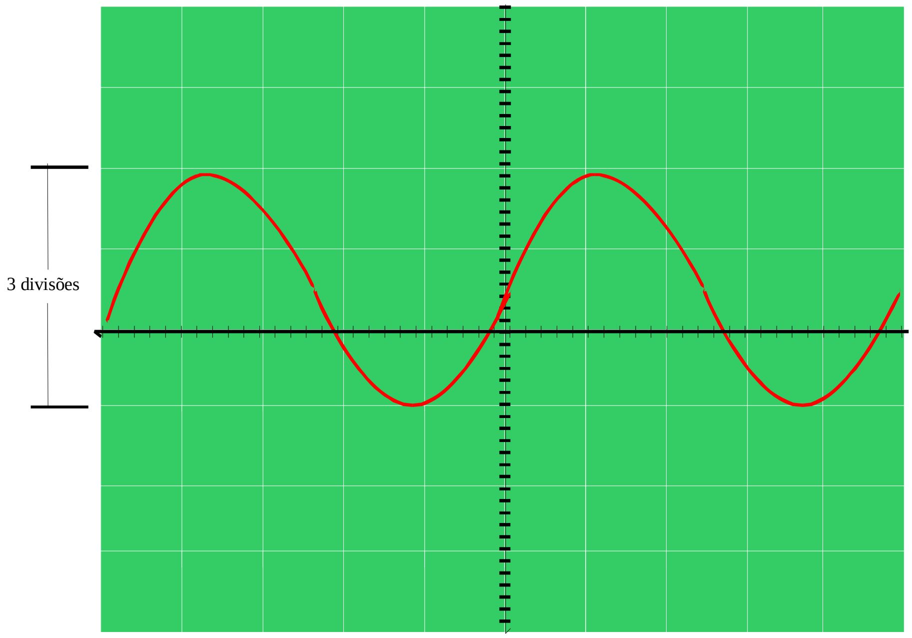


Fig.19 Ajuste vertical da figura.

Dispondo de uma linha de referência, a leitura da amplitude em número de divisões torna-se mais fácil.

Pode-se também movimentar horizontalmente a figura (controle de posição horizontal - H.Position) sem prejuízo para a leitura.

Isto possibilita colocar o pico da tensão exatamente sobre o eixo vertical principal, facilitando a leitura, conforme ilustrado na **Fig.20**.

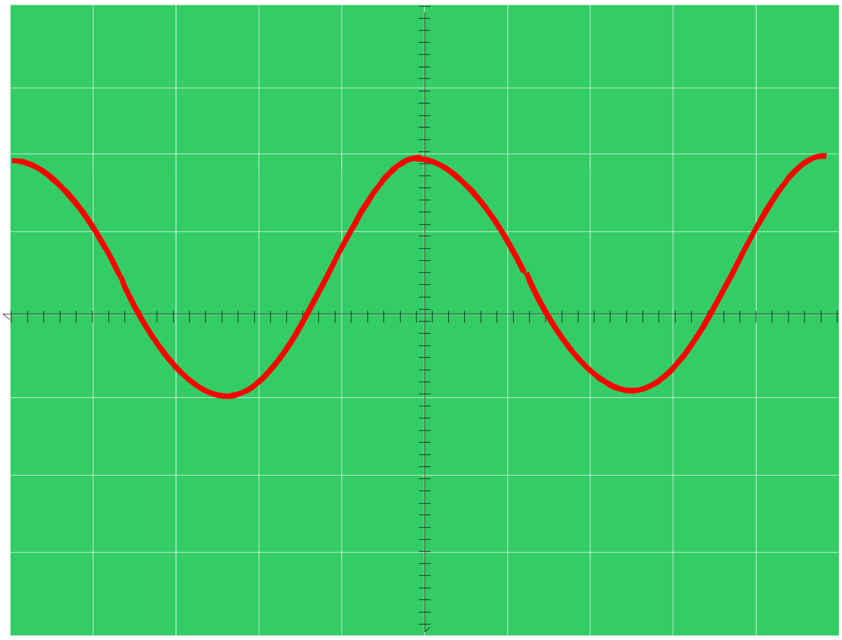
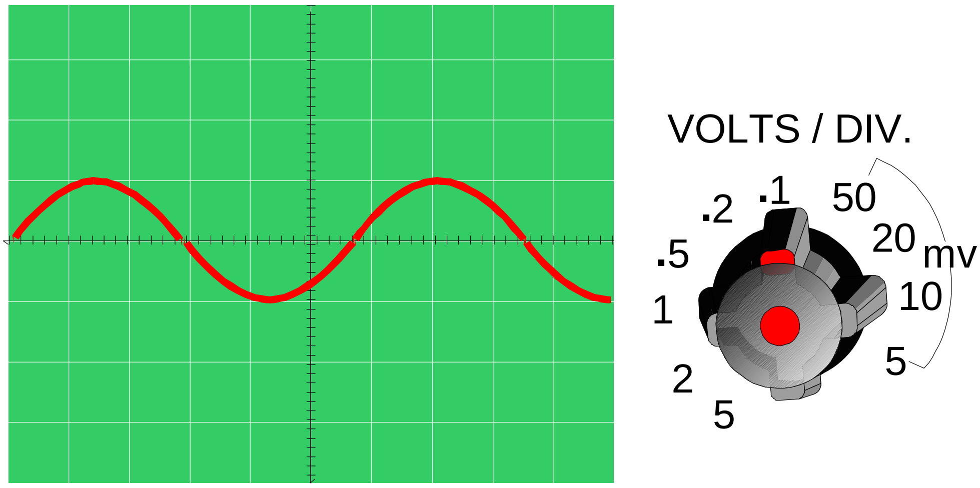


Fig.20 Ajuste horizontal da figura.

Exemplo 1:

Determine a tensão de pico a pico e eficaz para a tensão CA da figura abaixo. Considere a chave seletora na posição .1.



Solução

$$2 \text{ divisões} \times 0{,}1\text{V/DIV} = 200\text{m}V_{pp}$$

Para se determinar a tensão eficaz do sinal observado na tela, usam-se as relações matemáticas correspondentes a cada tipo de sinal.

Como a tensão de pico a pico (obtida na tela) é o dobro da tensão de pico ($V_{pp} = 2V_p$) a tensão eficaz (V_{ef}) a partir da tensão de pico a pico é:

$$V_{ef} = \frac{V_{pp}}{2\sqrt{2}} = \frac{200}{2{,}828} = 71\text{mV} \qquad (1)$$

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Cite as três etapas de preparação para a medição de tensão CC com o osciloscópio.

2. Cite as três etapas do processo de medição da tensão CA com o osciloscópio.

BIBLIOGRAFIA

SENAI/DN. **Reparador de Circuitos Eletrônicos**. Eletrônica básica I. Rio de Janeiro. (Coleção Básica SENAI - Módulo 1).

ZBAR, PAUL B. **Instrumentos e medidas em eletrônica**; Práticas de Laboratório. Trad. Aracy Mendes da Costa. São Paulo, McGraw-Hill, 1978, 229p.

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Integração – Fortalecer o trabalho em equipe é essencial para a consecução dos objetivos e satisfação dos clientes externos e internos.

Introdução

Existem instrumentos de laboratório que se destinam à determinação da freqüência de sinais alternados: são os freqüencímetros.

Entretanto, os freqüencímetros são muito mais raros do que os osciloscópios, razão pela qual é importante que todo profissional que trabalha com eletrônica saiba como usar o osciloscópio para determinar a freqüência de um sinal.

Este fascículo foi elaborado com o objetivo de capacitá-lo a determinar uma freqüência de um sinal alternado com o osciloscópio. Nele serão apresentados todos os conhecimentos necessários para que o leitor possa utilizar mais este recurso do osciloscópio.

Para ter sucesso no desenvolvimento do conteúdo e atividades deste fascículo, o leitor deverá ter conhecimentos relativos a:

- Corrente alternada.
- Osciloscópio.

Os controles da base de tempo do osciloscópio

O traço na tela de um osciloscópio é formado pelo movimento rápido de um ponto, controlado por circuitos denominados de base de tempo.

O movimento horizontal do ponto é denominado de varredura. Por esta razão, os controles da base de tempo do osciloscópio também são conhecidos por **controles de varredura**.

Através dos controles da base de tempo, pode-se fazer com que o ponto se desloque mais rápido ou mais lentamente na tela do osciloscópio.

Os osciloscópios em geral têm três controles de base de tempo:

- Chave seletora da base de tempo (H.SWEEP).
- Ajuste fino da base de tempo (H.VERNIER).
- Ampliador horizontal.

Estes controles são comuns a todos os traços do osciloscópio (duplo traço, quatro traços ou mais).

Em osciloscópios de duplo traço os controles da base de tempo são comuns aos dois traços.

A **Fig.1** destaca o grupo da base de tempo em um modelo de osciloscópio.

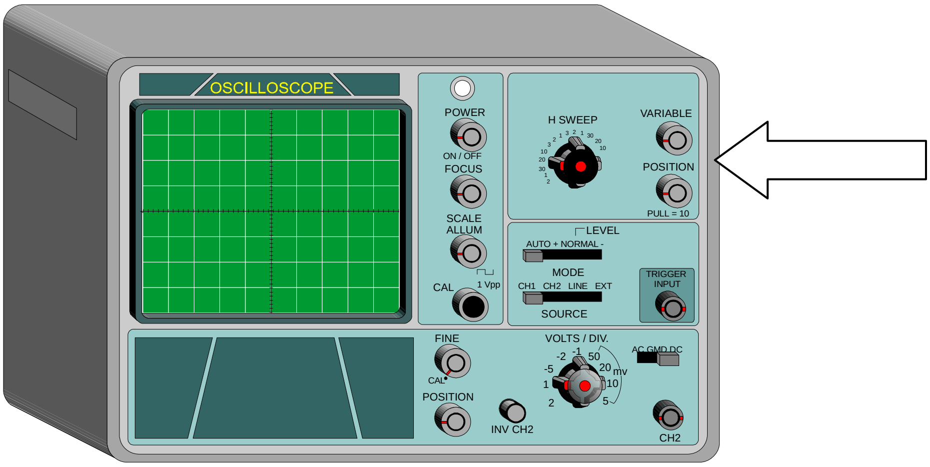


Fig.1 Destaque do grupo de base de tempo em um osciloscópio típico.

CHAVE SELETORA DA BASE DE TEMPO

A chave seletora da base de tempo é calibrada em valores de **tempo por divisão** (ms/div; μs/div).

Esta chave determina quanto tempo o ponto leva para percorrer uma divisão da tela no sentido horizontal. Por exemplo, se a chave seletora da base de tempo está posicionada em lms/div, o ponto leva 1 milisegundo para percorrer uma divisão horizontal da tela, como ilustrado na **Fig.2**.

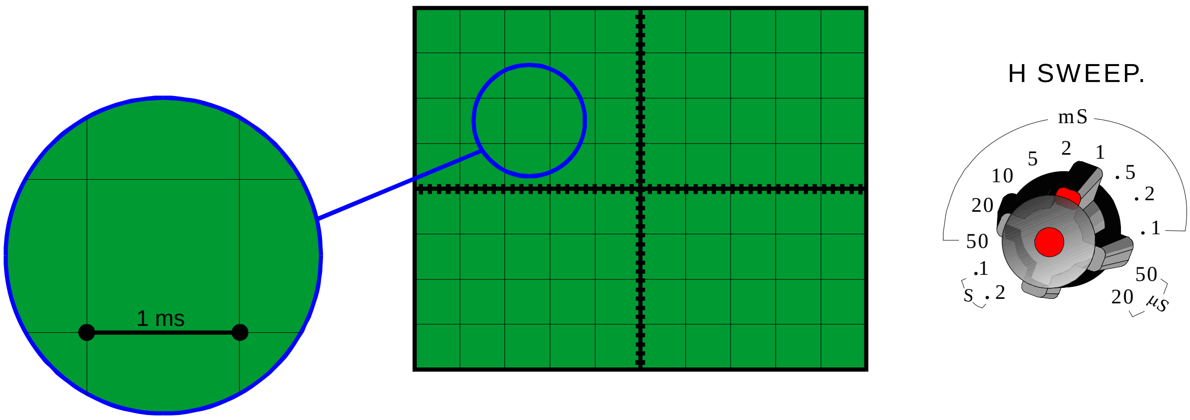


Fig.2 Base de tempo.

A posição da chave seletora da base de tempo determina o tempo necessário para que o ponto percorra uma divisão da tela no sentido horizontal.

Através desta chave seletora pode-se expandir ou comprimir horizontalmente a figura na tela, conforme ilustrado na **Fig.3**.

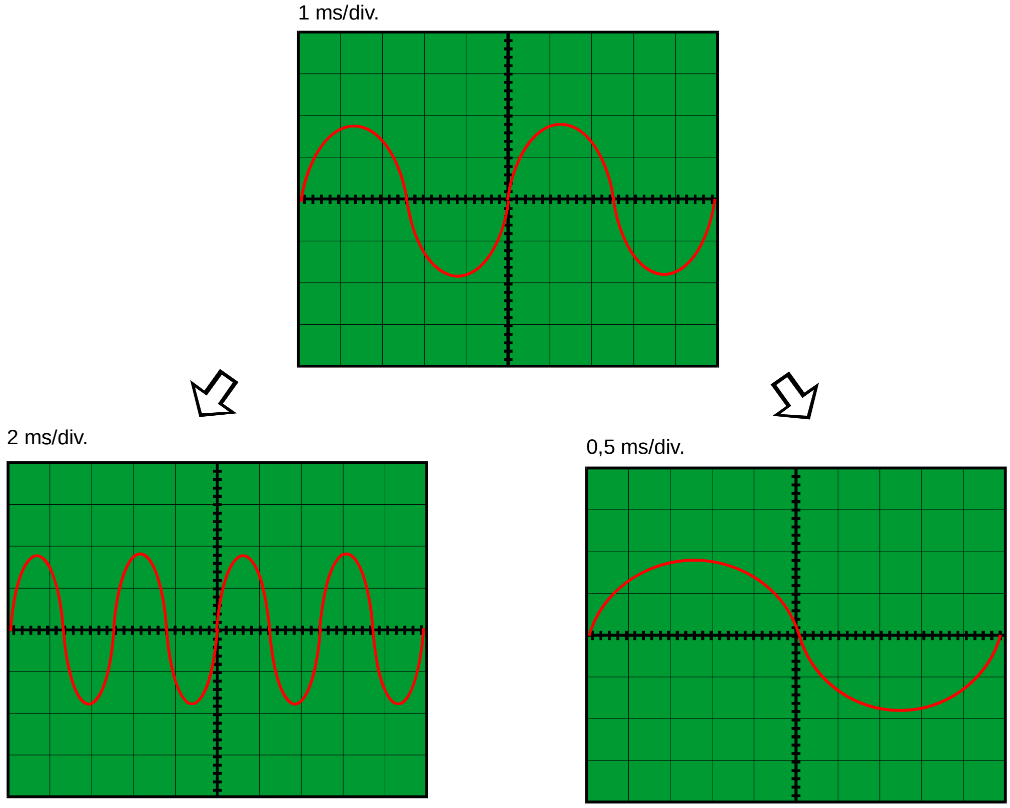


Fig.3 Expansão e compressão de uma forma de onda.

AJUSTE FINO DA BASE DE TEMPO

É um botão que atua em conjunto com a chave seletora da base de tempo. Este controle permite que o tempo de deslocamento horizontal do ponto na tela seja ajustado para valores intermediários entre uma posição e a outra da base de tempo. Por exemplo, se a chave seletora da base de tempo tem as posições 1ms/div e 0,5ms/div, o ajuste fino permite que se ajuste o tempo entre estes dois valores (0,6ms/div; 0,85ms/div; etc.). Na tela, o efeito do ajuste fino é de ajustar a largura da figura em qualquer proporção que se deseje.

Um aspecto importante deve ser ressaltado: o ajuste fino não tem escala, de forma que não é possível saber exatamente que tempo o ponto leva para deslocar-se numa divisão horizontal.

Quando se utiliza o ajuste fino da base de tempo, não é possível determinar que tempo o ponto leva para percorrer uma divisão da tela no sentido horizontal.

Este controle de ajuste fino tem uma posição denominada CALIBRADO. Quando o controle de ajuste fino está na posição **calibrado**, o tempo de deslocamento horizontal do ponto em uma divisão horizontal da tela é determinado somente pela posição da chave seletora de base de tempo, como mostrado na **Fig.4**.

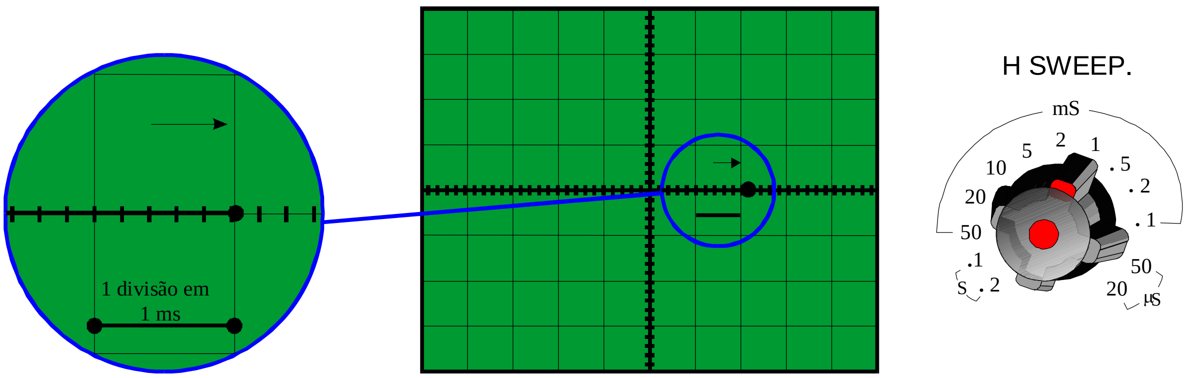


Fig.4

Sempre que for necessário conhecer o tempo de deslocamento horizontal do ponto em uma divisão o ajuste fino da base de tempo tem que ser posicionado em <u>calibrado</u>.

AMPLIADOR

O ampliador (*magnifier*), também denominado de expansor, também atua na largura da figura na tela. Em geral, os expansores permitem que a figura seja ampliada 5 ou 10 vezes no sentido horizontal. Nem todos os osciloscópios têm este controle.

Medição de freqüência com osciloscópio

O osciloscópio pode ser utilizado para determinação da freqüência de um sinal elétrico. Isto é possível devido ao fato de que o período de uma CA pode ser determinado através de um osciloscópio.

RELAÇÃO ENTRE PERÍODO E FREQÜÊNCIA

Freqüência (f) é o número de ciclos completos de um fenômeno repetitivo que ocorre na unidade de tempo.

Freqüência é o número de ciclos completos em 1s.

Período (T) é o tempo necessário para que ocorra um ciclo completo de um fenômeno repetitivo.

Período é o tempo de ocorrência de 1 ciclo.

A freqüência e o período de um fenômeno estão intimamente relacionados. O relacionamento entre as duas grandezas é expresso pela equação:

$$f = \frac{1}{T} \qquad (1)$$

A equação mostra que quando a freqüência aumenta o período diminui e vice-versa. Uma vez conhecido o período de um sinal a equação permite que se determine sua freqüência.

Através da observação de sinais elétricos na tela do osciloscópio pode-se determinar o seu período e, portanto, calcular a sua freqüência.

DETERMINAÇÃO DO PERÍODO DE UM SINAL

O eixo horizontal do osciloscópio é denominado de **eixo dos tempos** porque através das suas divisões pode-se determinar o período de formas de onda alternadas.

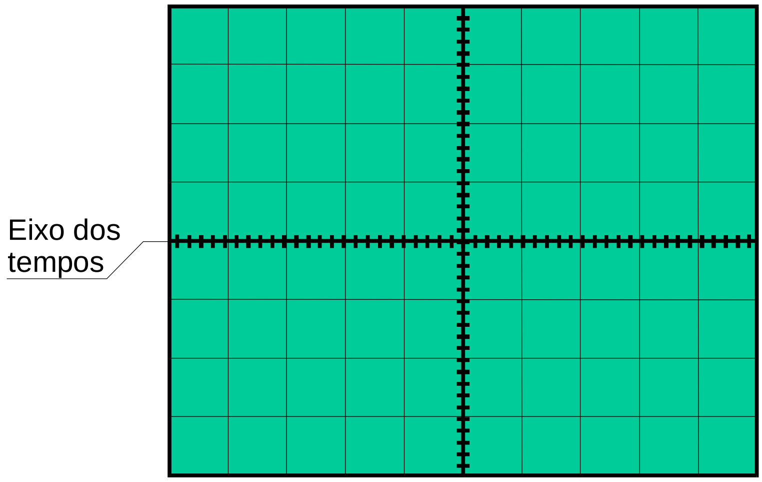


Fig.5 Eixos dos tempos.

Para que o período de uma CA possa ser determinado com precisão, o controle de ajuste fino da base de tempo tem que ser mantido na posição CALIBRADO. Quanto menor o número de ciclos projetados na tela, mais precisa pode ser a leitura de período com o osciloscópio. Se o ajuste fino da base de tempo não é calibrado a determinação do período estará incorreta.

O sinal alternado cuja freqüência se deseja determinar é aplicado a um dos canais do osciloscópio, projetado na tela e sincronizado.

O ajuste da base de tempo através da chave seletora possibilita a compreensão ou expansão da forma de onda na tela de forma que se obtenha uma figura adequada a observação e leitura do período.

Quanto maior o número de ciclos projetados na tela, mais precisa poderá ser a determinação do período.

Na determinação de um período com um osciloscópio, deve-se ajustar a base de tempo na posição calibrado.

O ideal é conseguir projetar apenas um ciclo da CA na tela, com auxílio apenas da chave seletora da base de tempo, uma vez que o ajuste fino tem que estar calibrado.

Como isto nem sempre é possível, procura-se obter o menor número de ciclos possível.

Com a CA projetada na tela deve-se estabelecer um ponto na figura que será considerado como início do ciclo e posicioná-lo exatamente sobre uma das divisões do eixo horizontal.

A **Fig.6** mostra uma CA projetada na tela do osciloscópio, ilustrando o ponto escolhido como **início do ciclo**.

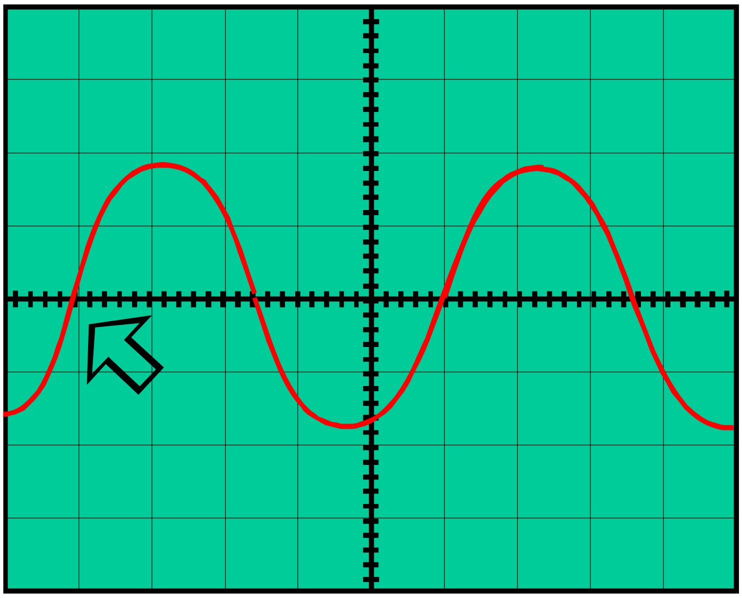


Fig.6 Indicação do início de um ciclo.

Com o início do ciclo posicionado, verifica-se o número de divisões do eixo horizontal ocupado pelo ciclo completo.

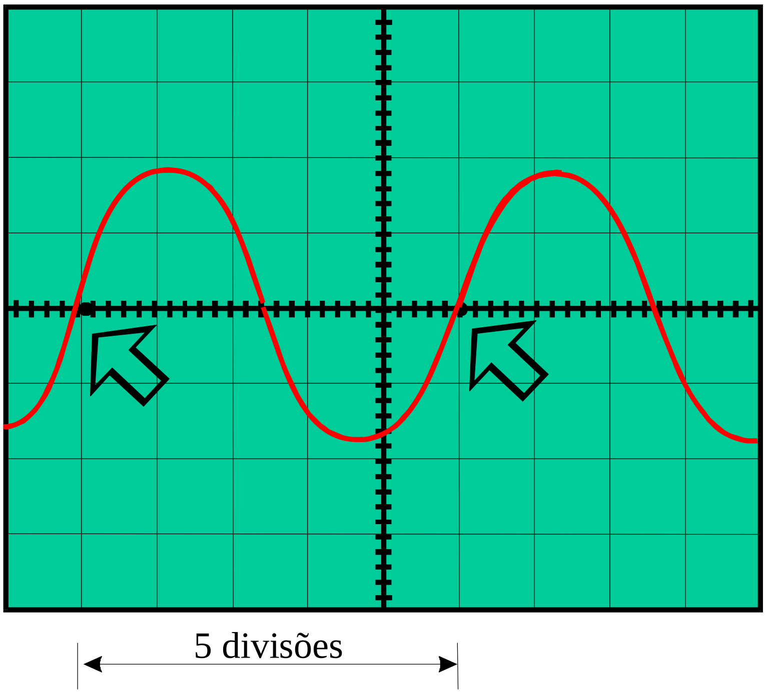


Fig.7 Indicação do fim de um ciclo.

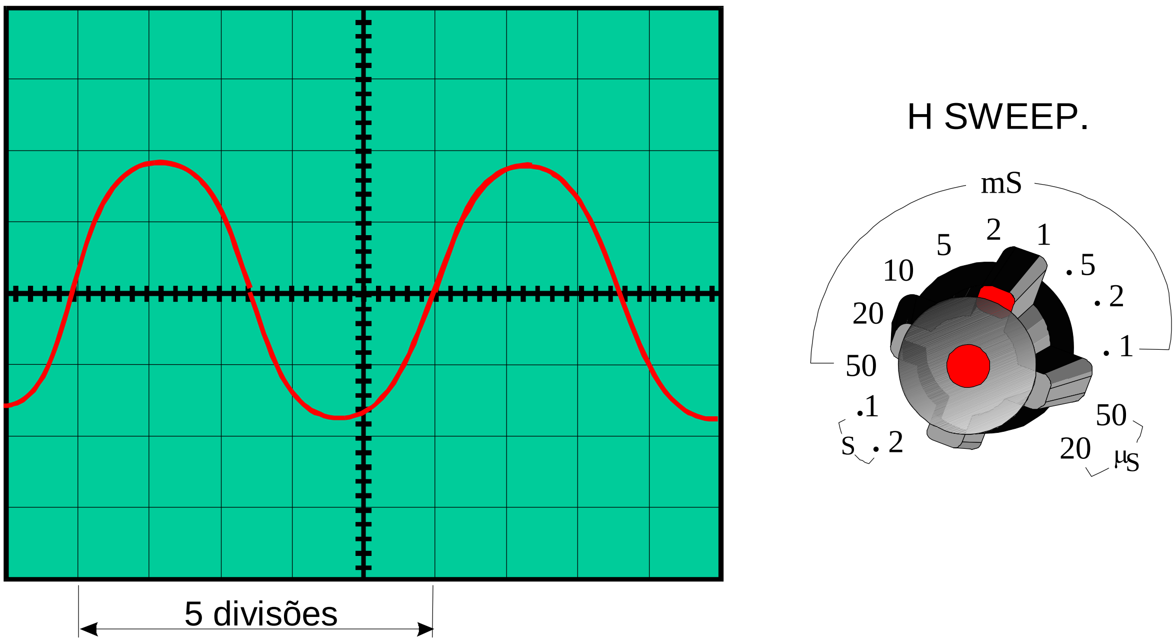
A figura pode ser movimentada vertical ou horizontalmente na tela (controles de posição) sem prejuízo para a leitura

Conhecendo-se o tempo de cada divisão horizontal e o número de divisões horizontais ocupados por um ciclo da CA, pode-se determinar o período desta CA.

O período de um sinal CA pode ser determinado multiplicando-se o número de divisões horizontais de um ciclo lido na tela de um osciloscópio pelo tempo de uma divisão fornecido pela posição da chave seletora da base de tempo.

<u>Exemplo 1</u>:

Determinar o período e a frequência da CA senoidal da figura abaixo.



<u>Solução</u> :

Como o período (T) é o número de divisões multiplicado pelo tempo de 1 divisão, tem-se que :

$$T = 5{,}0 \times 1\text{ms} = 5\text{ ms.}$$

Com o período determinado, pode-se calcular a freqüência (f) do sinal através da **Eq.(1)** :

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0{,}005} = 200\text{Hz}$$

Em resumo, a determinação de freqüência é feita segundo os procedimentos a seguir:

- Posicionar o ajuste fino de base de tempo em CALIBRADO.
- Projetar a CA na tela e sincronizar.
- Obter o menor número possível de ciclos na tela.
- Determinar o período.
- Calcular a freqüência (f=1/T).

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Qual a função da chave seletora da base de tempo de um osciloscópio ?

2. Como se determina o período de um sinal CA com um osciloscópio ?

BIBLIOGRAFIA

BOYLESTAD, ROBERT & NASHELSKY, LOUIS. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos.** 3.ª ed., S.1, Prentice-Hall. 1984.

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Melhoria da Qualidade – Buscar constantemente a melhoria do desempenho no trabalho, visando à excelência dos resultados.

Introdução

Os capacitores são componentes largamente empregados nos circuitos eletrônicos podendo cumprir funções tais como o armazenamento de cargas ou a seleção de freqüências em filtros para as caixas de som.

Este fascículo é o primeiro a respeito dos capacitores e foi elaborado visando a familiarizá-lo com alguns aspectos deste componente tais como: constituição, tipo e características.

A partir deste fascículo, pode-se dizer que o capacitor fará parte diária do estudo da eletrônica básica, razão pela qual o conteúdo apresentado é de grande importância.

Para ter sucesso no desenvolvimento do conteúdo e atividades deste fascículo, o leitor deverá ter conhecimentos relativos a:

- Condutores e isolantes.
- Potencial elétrico.

Capacitor

O capacitor é um componente capaz de armazenar cargas elétricas, sendo largamente empregado nos circuitos eletrônicos.

Um capacitor se compõe basicamente de duas placas de material condutor, denominadas de armaduras, isoladas eletricamente entre si por um material isolante chamado dielétrico, como pode ser visto na **Fig.1**.

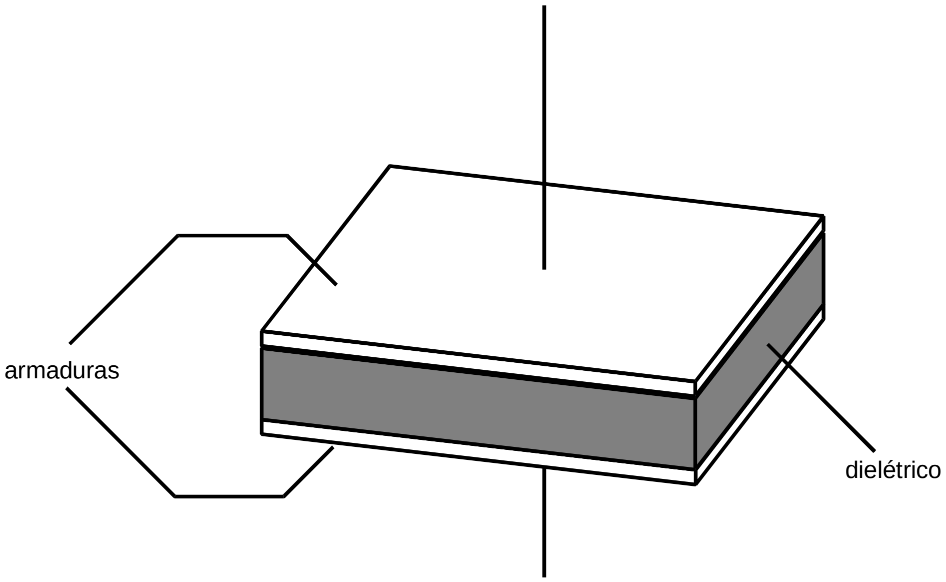


Fig.1 Constituição de um capacitor.

O material condutor que compõe as armaduras de um capacitor é eletricamente neutro no seu estado natural.

Em cada uma das armaduras, o número total de prótons e elétrons é igual, portanto as placas não têm potencial elétrico.

Não existindo potencial elétrico em cada uma das armaduras, não há diferença de potencial ou tensão entre elas, conforme ilustrado na **Fig.2**.

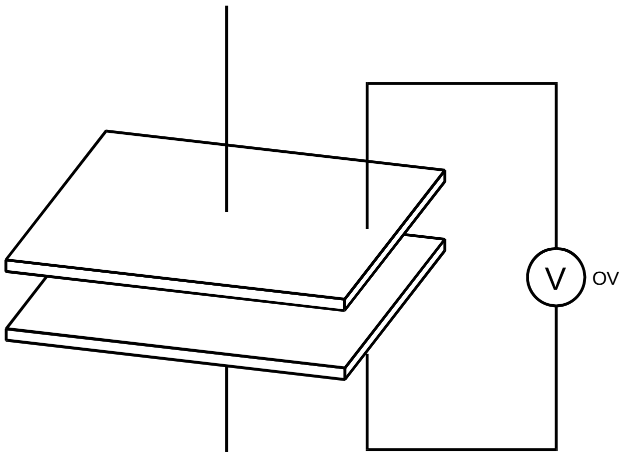


Fig.2 Diferença de potencial zero.

O fenômeno de armazenamento de cargas pelo capacitor pode ser compreendido mais facilmente analisando o movimento de elétrons no circuito. Por esta razão será utilizado o **sentido eletrônico** da corrente elétrica no desenvolvimento do assunto.

Conectando-se os terminais do capacitor a uma fonte de CC, o capacitor fica sujeito à diferença de potencial dos pólos da fonte.

O potencial da bateria aplicado a cada uma das armaduras faz surgir entre elas uma força **elétrica**, que nada mais é do que uma força de atração (cargas de sinal diferente) ou repulsão (cargas de mesmo sinal) entre cargas elétricas.

O pólo positivo da fonte absorve elétrons da armadura à qual está conectado enquanto o pólo negativo fornece elétrons à outra armadura, como ilustrado na **Fig.3**.

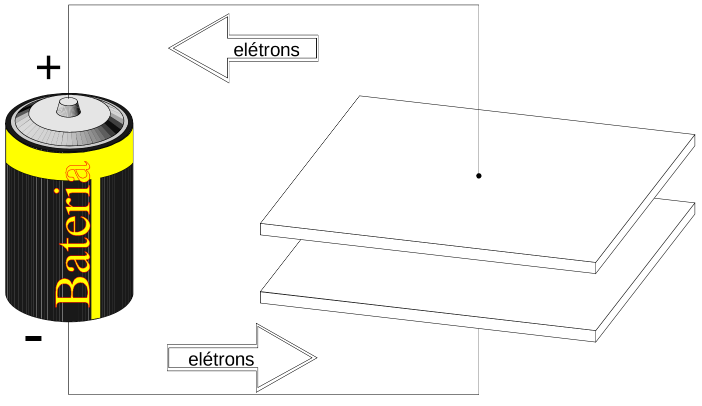


Fig.3 Absorção de elétrons da armadura no polo positivo e fornecimento de elétrons do negativo à armadura.

A armadura que fornece elétrons à fonte fica com íons positivos adquirindo um potencial positivo e a armadura que recebe elétrons da fonte fica com íons negativos, adquirindo potencial negativo, conforme ilustrado na **Fig.4**.

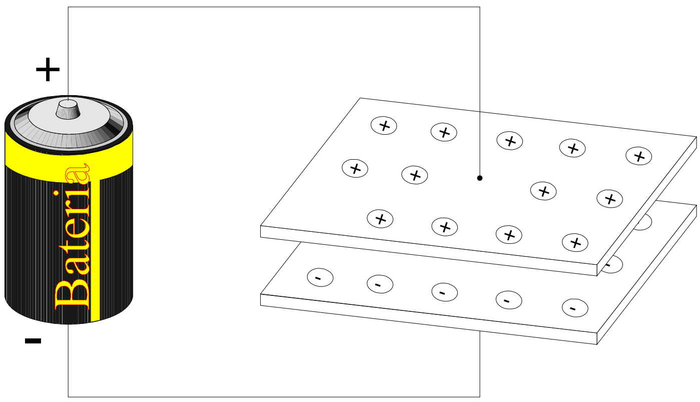


Fig.4 Cargas em um capacitor conectado a uma fonte.

Isto significa que ao conectar o capacitor a uma fonte de CC, surge uma diferença de potencial entre as suas armaduras.

A tensão presente nas armaduras do capacitor terá um valor tão próximo ao da tensão da fonte que, para efeitos práticos, pode-se considerá-las iguais, como indicado na **Fig.5**.

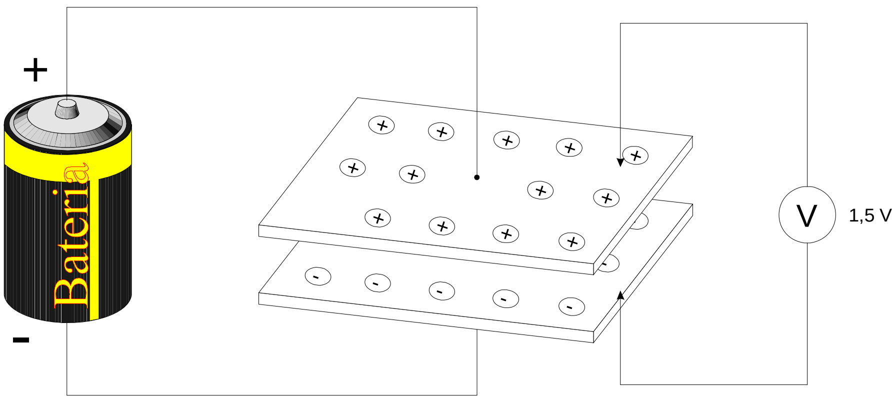


Fig.5 Tensão das armaduras igual à tensão da fonte.

Um capacitor conectado diretamente a uma fonte de alimentação apresenta entre suas armaduras uma tensão que pode ser considerada igual à da fonte.

Quando o capacitor assume a mesma tensão da fonte de alimentação, diz-se que o capacitor está **carregado**.

Se após ter sido carregado o capacitor for desconectado da fonte de CC, suas armaduras permanecem com os potenciais adquiridos, como ilustrado na **Fig.6**.

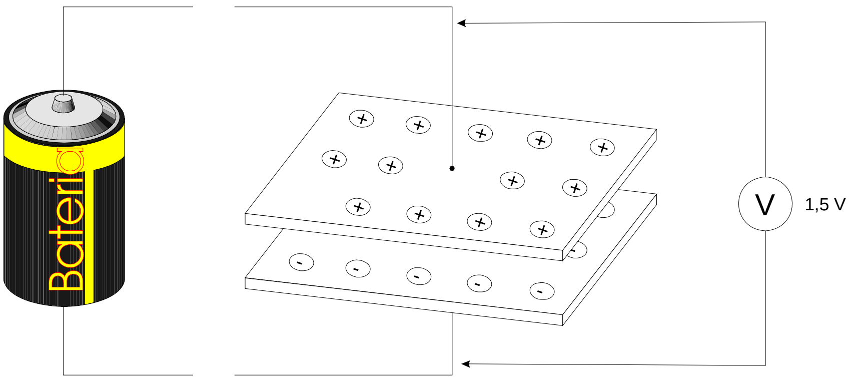


Fig.6 Permanência dos potenciais das armaduras após a fonte CC ser desconectada.

Isto significa dizer que, mesmo após ter sido desconectado da fonte de CC, ainda existe tensão presente entre as placas do capacitor.

Resumindo-se, pode-se dizer que quando um capacitor é conectado a uma fonte de CC, ele absorve energia desta fonte, armazenando cargas elétricas (íons positivos e negativos) nas suas armaduras.

Esta capacidade de absorver e manter a energia em suas armaduras é que define o capacitor como sendo um armazenador de cargas elétricas.

A energia armazenada no capacitor na forma de desequilíbrio elétrico entre suas armaduras pode ser reaproveitada.

DESCARGA DO CAPACITOR

Tomando-se um capacitor carregado e conectando-se seus terminais a uma carga, haverá uma circulação de corrente, pois o capacitor atua como fonte de tensão. Este comportamento pode ser visto na **Fig.7**.

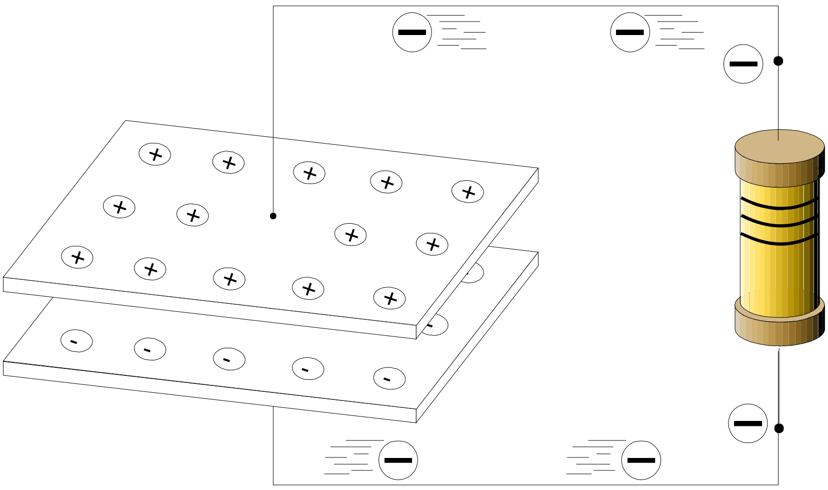


Fig.7 Descarga de um capacitor sobre uma carga (resistor).

Isto se deve ao fato de que através do circuito fechado inicia-se o restabelecimento do equilíbrio elétrico entre as armaduras.

Os elétrons em excesso em uma das armaduras movimentam-se para a outra onde há falta de elétrons, até que se reestabeleça o equilíbrio de potencial entre elas, como ilustrado na **Fig. 8**.

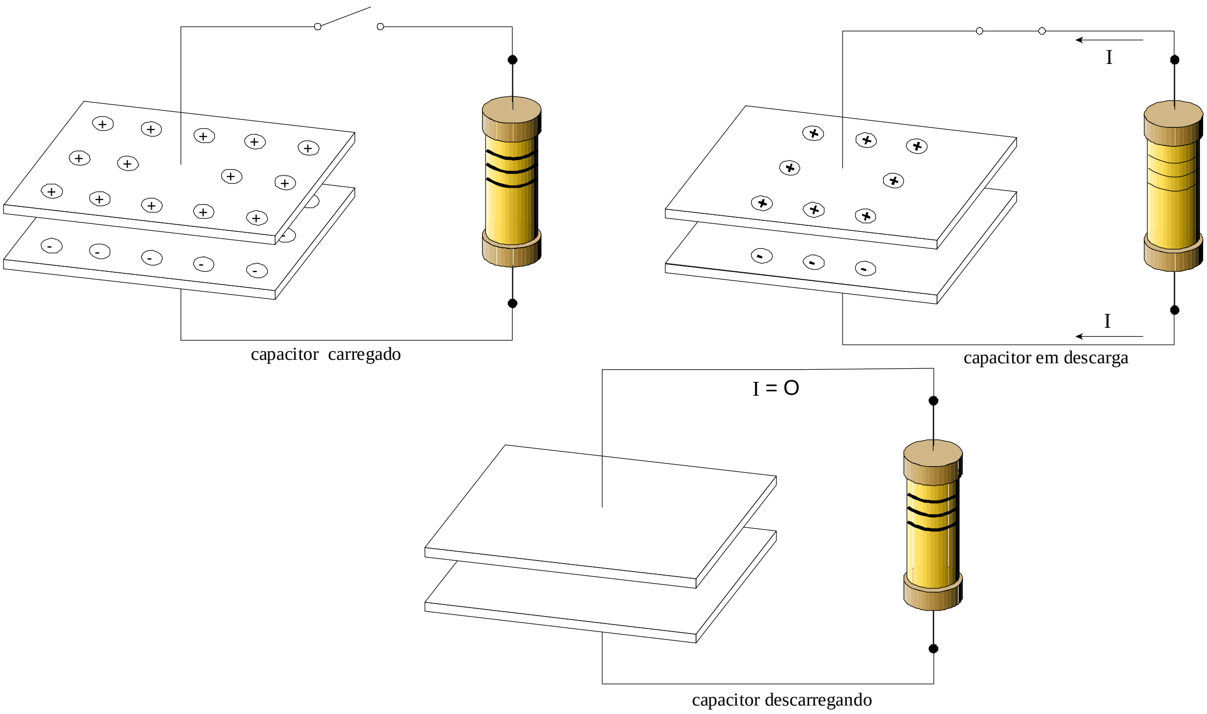


Fig. 8 Elétrons nas armaduras.

Durante o tempo em que o capacitor se descarrega, a tensão entre suas armaduras diminui porque o número de íons restantes em cada armadura é cada vez menor. Após algum tempo, a tensão entre as armaduras é tão pequena que pode ser considerada zero.

Quando um capacitor está em descarga, a tensão entre as suas armaduras diminui até praticamente zero.

Capacitância

A capacidade de armazenamento de cargas de um capacitor depende dos seguintes : área comum entre as armaduras, espessura do dielétrico e natureza do dielétrico.

ÁREA DAS ARMADURAS

Quanto maior a área das armaduras, maior a capacidade de armazenamento de um capacitor.

ESPESSURA DO DIELÉTRICO

Quanto mais fino o dielétrico, mais próximas estão as armaduras. O campo elétrico formado entre as armaduras é maior e a capacidade de armazenamento também.

NATUREZA DO DIELÉTRICO

Quanto maior a capacidade de isolação do dielétrico, maior a capacidade de armazenamento do capacitor.

A capacidade de um capacitor de armazenar cargas é denominada de capacitância. (C) se define sendo a razão entre a carga elétrica a armadura (Q) pela diferença de potencial entre elas (V) :

$$C = \frac{Q}{V} \qquad (1)$$

Quanto maior a capacitância, maior a capacidade de armazenamento de cargas.

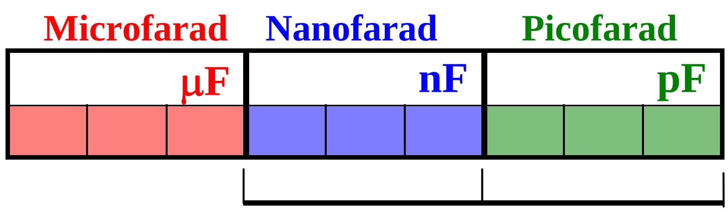
A unidade de medida de capacitância é o **farad** e é representada pela letra **F.** Entretanto, a unidade farad é extremamente grande, o que leva ao uso de submúltiplos dessa unidade.

A **Tabela 1** apresenta os símbolos representativos de cada submúltiplo e o seu valor com relação à unidade.

Tabela 1 Submúltiplos do farad.

Denominação	**Símbolo**	**Relação com a unidade**
Microfarad	µF	10^{-6}F ou 0,000001F
Nanofarad	nF	10^{-9}F ou 0,000000001F
Picofarad	pF	10^{-12}F ou 0,000000000001F

A conversão de valores entre as subunidades é feita da mesma forma que as outras grandezas.



Apresentam-se a seguir alguns exemplos de conversão.

1) 1µF é o mesmo que 1.000nF.
2) 22nF é o mesmo que 22.000pF.
3) 68nF é o mesmo que 0,068µF.
4) 150pF é o mesmo que 0,15nF.
5) 820nF é o mesmo que 0,82µF.
6) 1.200pF é o mesmo que 1,2nF.
7) 47.000pF é o mesmo que 47nF.
8) 47.000pf é o mesmo que 0,047µF.

A capacitância é um dos itens que especifica um capacitor.

TENSÃO DE TRABALHO

Além da capacitância, os capacitores têm ainda outra característica elétrica importante: a tensão de trabalho.

A tensão de trabalho é a tensão máxima que o capacitor pode suportar entre as suas armaduras. A aplicação de uma tensão no capacitor superior a sua tensão de trabalho máxima, pode provocar o rompimento do dielétrico fazendo com que o capacitor entre em curto, perdendo as suas características. Na maioria dos capacitores, o rompimento do dielétrico danifica permanentemente o componente.

Deve-se tomar cuidado de utilizarem-se sempre capacitores com tensão de trabalho superior ao valor que o componente irá trabalhar realmente.

Tipos de capacitores

Atualmente encontra-se no mercado um grande número de tipos de capacitores, empregando os mais diversos materiais.

Estes capacitores podem ser resumidos em quatro tipos básicos:

- Capacitores fixos despolarizados.
- Capacitores ajustáveis.
- Capacitores variáveis.
- Capacitores eletrolíticos.

A **Fig.9** mostra alguns capacitores na sua forma real.

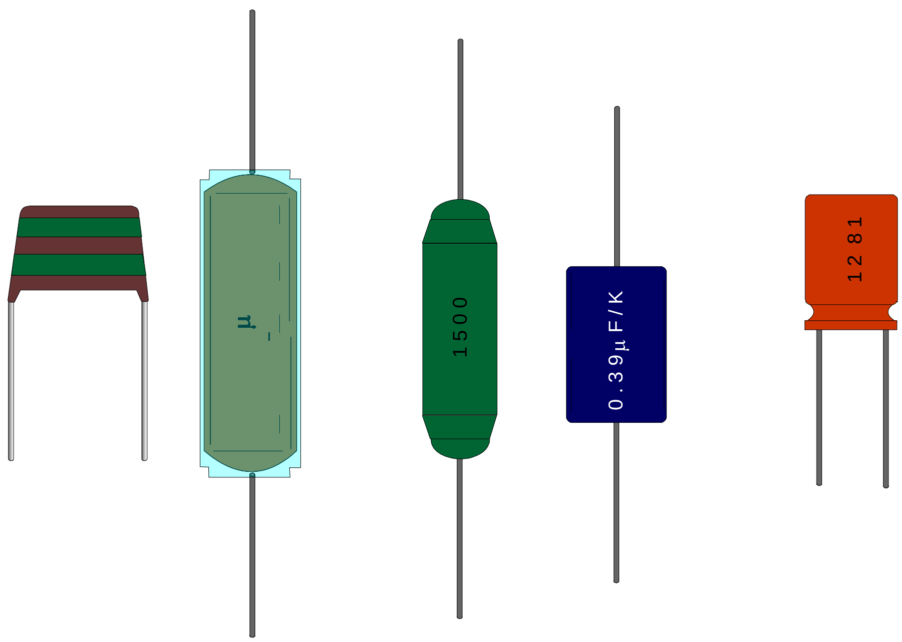


Fig.9 Alguns tipos de capacitores.

CAPACITORES FIXOS DESPOLARIZADOS

Apresentam um valor de capacitância específico, que não pode ser alterado. A **Fig.10** mostra o símbolo usado para representar os capacitores fixos despolarizados.

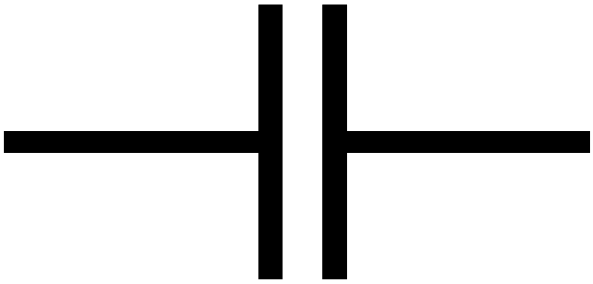
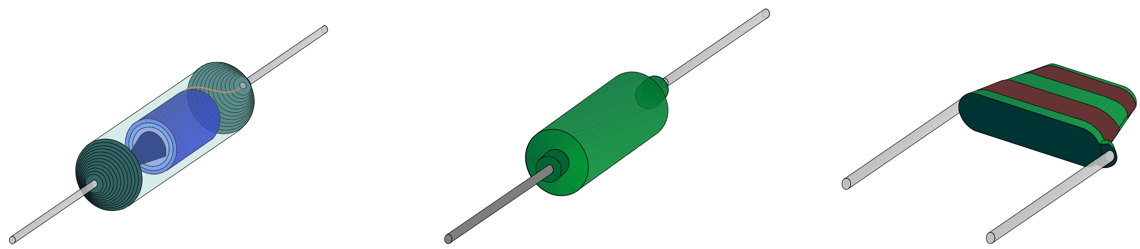


Fig.10 Símbolo dos capacitores fixos despolarizados.

A **Fig.11** mostra diversos tipos de capacitores fixos.



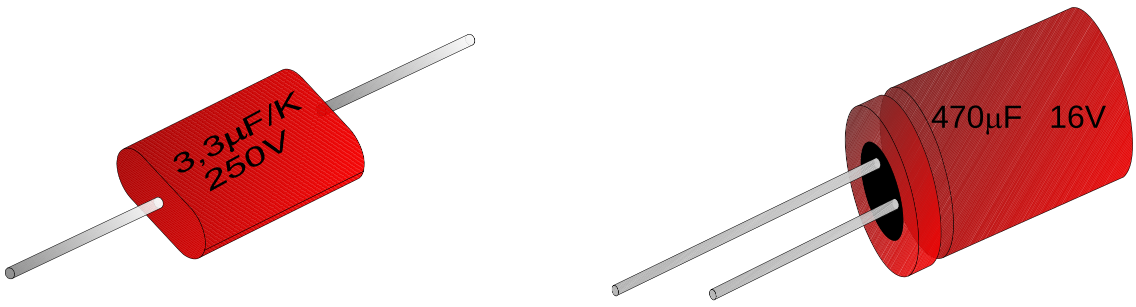
(a) **(b)** **(c)**

Fig.11 Diversos tipos de capacitores fixos : (a) stiroflex, (b) cerâmica e (c) poliester

Estes capacitores se caracterizam por ser despolarizados, ou seja, qualquer uma das suas armaduras pode ser ligada tanto a potenciais positivos como negativos.

Capacitores despolarizados não tem polaridade especificada para ligação.

Alguns capacitores fixos podem apresentar-se na versão axial com os dois terminais nas extremidades ou radial com os dois terminais no mesmo lado do corpo. A **Fig.12** mostra estes dois tipos de capacitores.



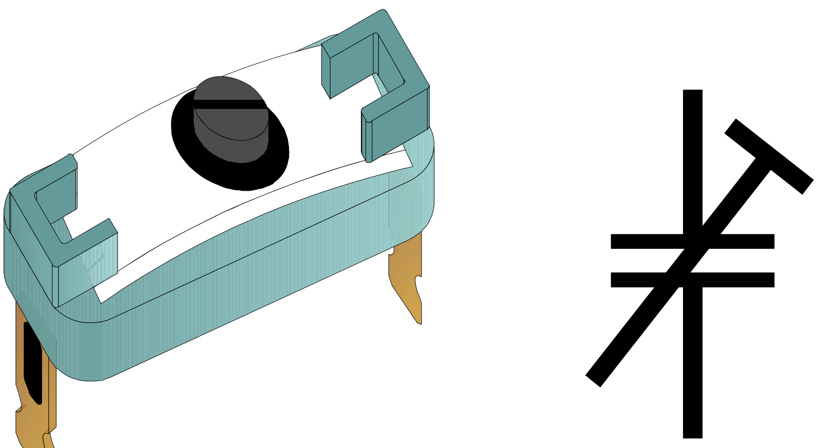
a **b**

Fig.12 Capacitor fixo : (a) axial e (b) radial.

De acordo com a necessidade de montagem, pode-se utilizar um ou outro tipo.

CAPACITORES AJUSTÁVEIS

São utilizados nos pontos de calibração dos circuitos. A **Fig.13** mostra um capacitor ajustável típico e o seu símbolo.



SÍMBOLO

Fig.13 Capacitor ajustável.

Apresentam valor de capacitância ajustável dentro de certos limites, por exemplo 10pF a 30pF.

CAPACITORES VARIÁVEIS

São utilizados em locais onde a capacitância é constantemente modificada.
A **Fig.14** mostra um capacitor variável e o seu símbolo.

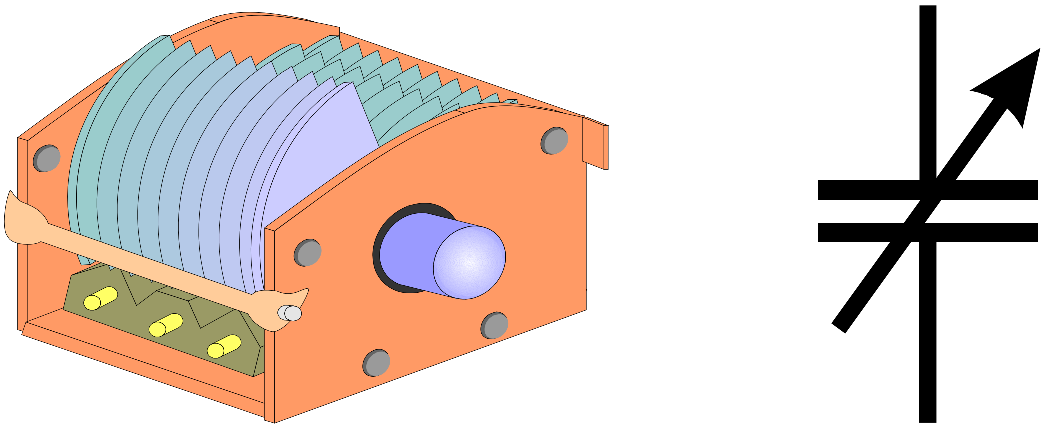


Fig.14 Capacitor variável e seu símbolo.

Encontram-se ainda capacitores variáveis múltiplos que se constituem de dois ou mais capacitores variáveis acionados pelo mesmo eixo. A **Fig.15** mostra um capacitor duplo e seu símbolo.

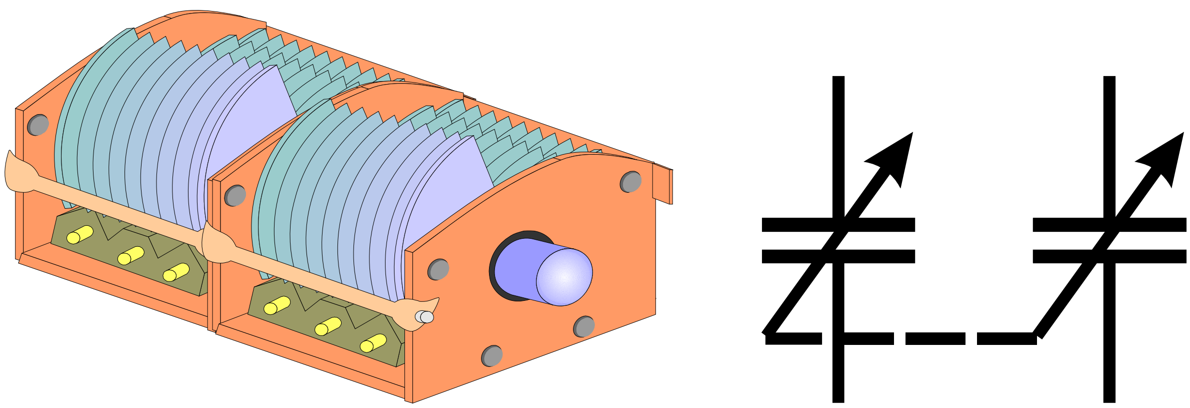


Fig.15 Capacitor duplo e seu símbolo.

A linha pontilhada indica que os dois capacitores têm seu movimento controlado pelo mesmo eixo.

CAPACITORES ELETROLÍTICOS

Os capacitores eletrolíticos são capacitores fixos cujo processo de fabricação permite a obtenção de altos valores de capacitância com pequeno volume.

A **Fig.16** permite uma comparação entre as dimensões de um capacitor eletrolítico e um não eletrolítico de mesmo valor.

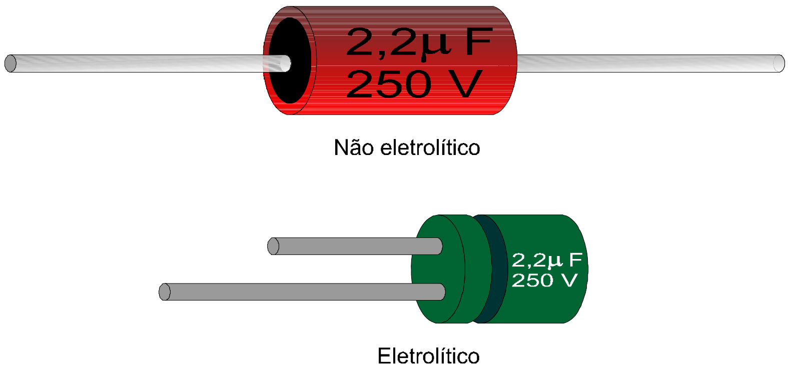


Fig.16 Comparação entre os volumes de um capacitor eletrolítico com um não eletrolítico.

O fator que diferencia os capacitores eletrolíticos dos demais capacitores fixos é o dielétrico. Nos capacitores fixos comuns o dielétrico é de papel, mica ou cerâmica. O dielétrico dos capacitores eletrolíticos é um preparado químico chamado de eletrólito que oxida pela aplicação de tensão elétrica, isolando uma armadura da outra. A utilização do eletrólito permite a redução da distância entre as armaduras a valores mínimos, o que possibilita a obtenção de maiores valores de capacitância (desde 1µF até os valores maiores que 200.000µF). O capacitor é selado em um invólucro de alumínio que isola as armaduras e o eletrólito da ação da umidade.

Os capacitores eletrolíticos apresentam algumas desvantagens que são decorrentes do seu processo de fabricação. São elas:

- Polaridade.
- Alteração de capacitância.
- Tolerância.

POLARIDADE

A formação da camada de óxido entre as placas depende da aplicação de tensão nas armaduras com polaridade correta.

A ligação com polaridade incorreta sobre as armaduras do capacitor provoca a destruição do eletrólito, permitindo a circulação de corrente entre as armaduras. O capacitor sofre um processo de aquecimento que faz o eletrólito ferver, podendo inclusive provocar uma explosão do componente devido à formação de gases no seu interior.

Os capacitores eletrolíticos polarizados são utilizados apenas em circuitos alimentados por corrente contínua. Nos circuitos de corrente alternada a troca de polaridade da tensão danifica o componente.

O símbolo dos capacitores eletrolíticos expressa a polaridade das armaduras, como pode ser visto na **Fig.17**.

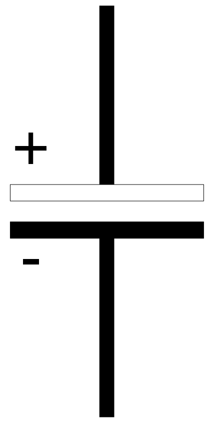
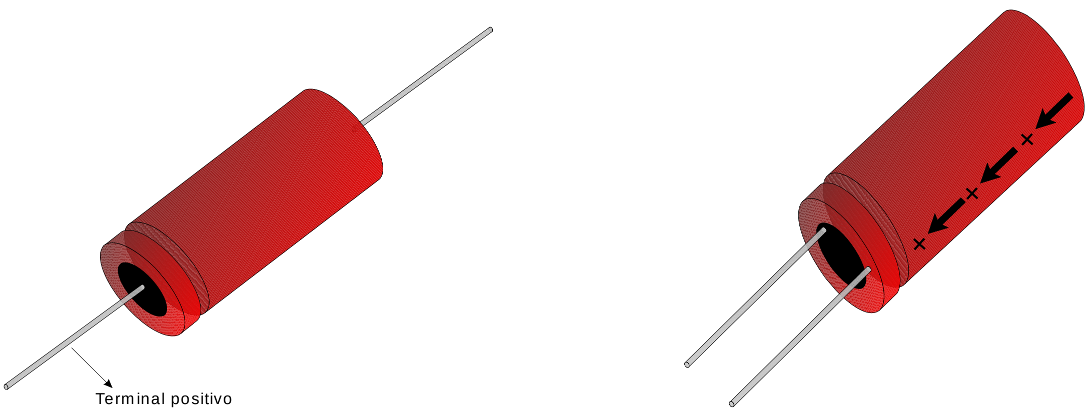


Fig.17 Símbolo dos capacitores eletrolíticos.

No componente, a polaridade é expressa de duas formas: por um chanfro na carcaça, que indica o terminal positivo ou pelo sinal positivo (+) impresso no corpo, como ilustrado na **Fig.18**.



(a) (b)

Fig.18 Indicação da polaridade em capacitor eletrolítico: (a) chanfro na carcaça ou (b) sinal positivo impresso.

ALTERAÇÃO DE CAPACITÂNCIA

O capacitor eletrolítico sofre alteração de capacitância quando não está sendo utilizado. Esta alteração se deve ao fato de que a formação da camada de óxido entre as armaduras depende da aplicação de tensão no capacitor.

Quando o capacitor eletrolítico permanece durante um período sem utilização, o dielétrico sofre um processo de degeneração que afeta sensivelmente a sua capacitância.

Capacitores eletrolíticos que não estão em uso têm a sua capacitância alterada.

Por esta razão, sempre que for necessário utilizar um capacitor que estava estocado durante algum tempo, deve-se conectá-lo a uma fonte de tensão contínua durante alguns minutos para permitir a reconstituição do dielétrico antes de aplicá-lo no circuito.

TOLERÂNCIA

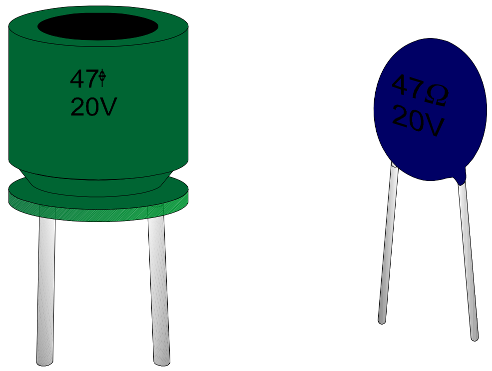
Os capacitores eletrolíticos estão sujeitos a uma tolerância elevada no valor real, com relação ao valor nominal. Esta tolerância pode atingir valores de 20 a 30% e até mesmo 50% em casos extremos.

Os capacitores eletrolíticos têm grande tolerância no seu valor de capacitância.

Existem dois tipos de capacitores eletrolíticos, que estão relacionados com o tipo de dielétrico empregado:

- Capacitor eletrolítico de óxido de alumínio.
- Capacitor eletrolítico de óxido de tântalo.

A **Fig.19** mostra um capacitor eletrolítico de óxido de alumínio e outro de tântalo.



(a) (b)

Fig.19 Capacitores eletrolíticos : (a) óxido de alumínio e (b) óxido de tântalo

Os capacitores eletrolíticos de óxido de tântalo apresentam a seguinte vantagem sobre os eletrolíticos de óxido de alumínio: a capacitância dos capacitores de óxido de tântalo sofre menor variação com o passar do tempo.

Existem ainda os capacitores eletrolíticos múltiplos, que consistem em dois, três ou até mesmo quatro capacitores no mesmo invólucro. A **Fig.20** mostra estes tipos de capacitores.

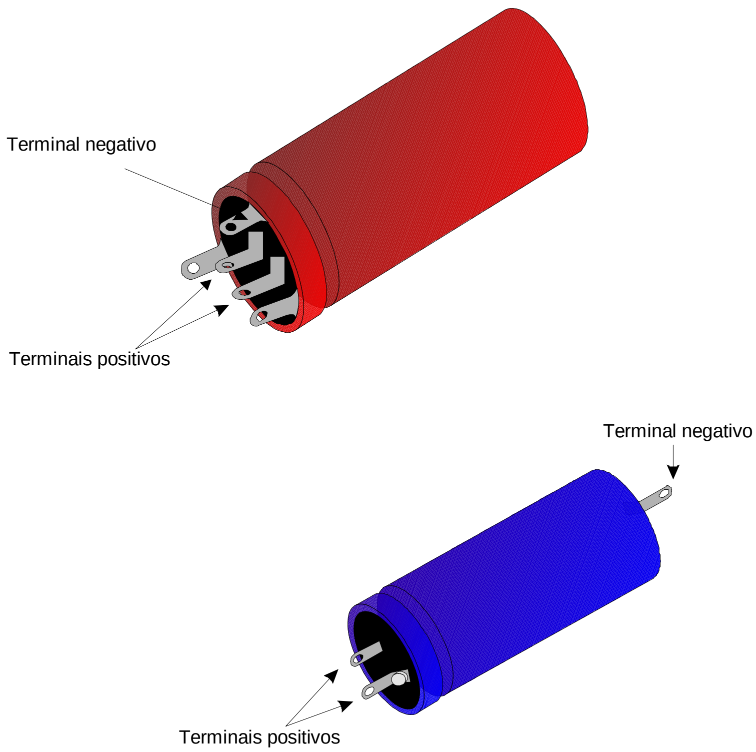


Fig.20 Capacitores eletrolíticos multíplos.

Em geral, nesses capacitores o invólucro externo ou carcaça é comum a todos os capacitores.

Capacitores eletrolíticos como os da **Fig.20**, são muito usados em fontes de alimentação. Os capacitores eletrolíticos múltiplos podem ser representados pelo símbolo mostrado na **Fig.21**.

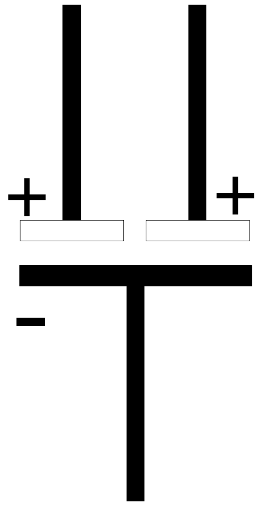


Fig.21 Símbolo dos capacitores eletrolíticos múltiplos.

Especificação técnica dos capacitores

Os capacitores são especificados tecnicamente por:

- Tipo.
- Capacitância.
- Tensão de trabalho.

Por exemplo : capacitor de poliester de 0,47µF e 600V e capacitor eletrolítico de 2.200µF e 63V.

APRESENTAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS NOS CAPACITORES

A capacitância e a tensão de trabalho dos capacitores é expressa no corpo do componente de duas formas:

- Diretamente em algarismos.
- Através de um código de cores.

A **Fig.22** apresenta alguns capacitores com os valores de capacitância e a tensão de trabalho expressos diretamente em algarismos.

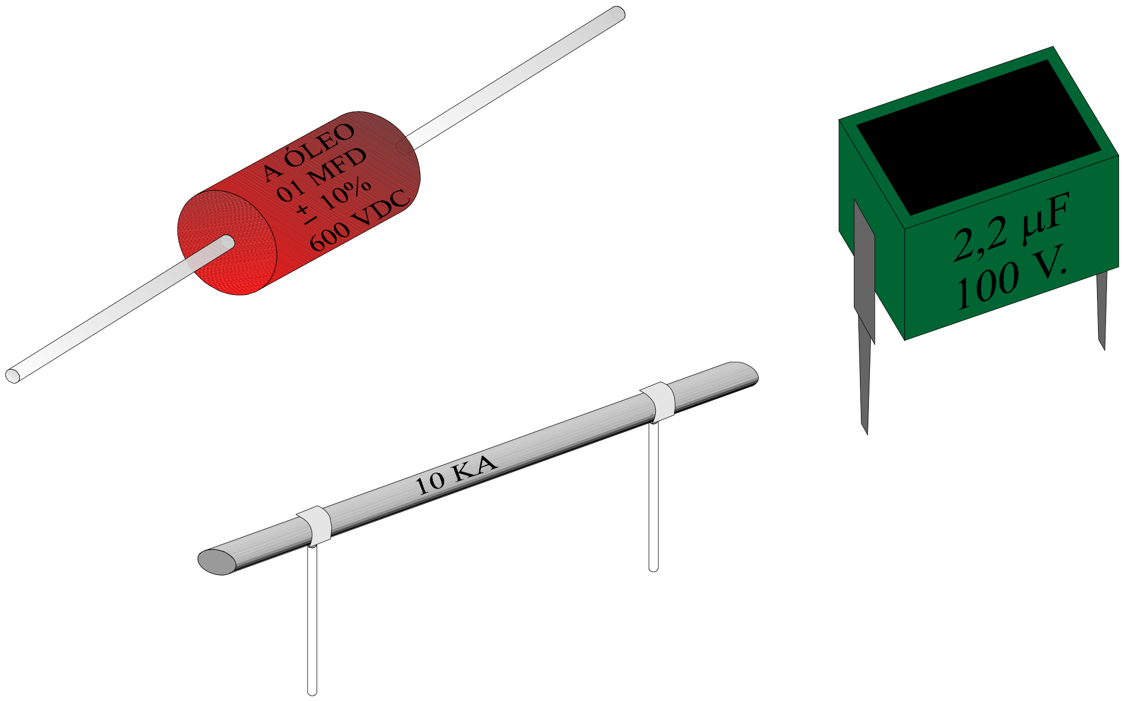


Fig.22 Valores dos capacitores expressos em algarismos.

Os valores são apresentados normalmente em microfarads (µF) ou picorafads (pF).

Quando os capacitores são menores que 1µF, como por exemplo 0,1µF, 0,0047µF ou 0,012µF, o zero que precede a vírgula não é impresso no corpo do componente. Nestes casos aparece diretamente um ponto, que representa a virgula, como ilustrado na **Tabela 2**.

Tabela 2 Valor real e valor impresso no capacitor.

Valor real	Valor impresso
0,1µF	.1µ
0,047µF	.047µ
0,012µF	.012µ
0,68µF	.68µ

CÓDIGO DE CORES PARA CAPACITORES

A **Fig.23** mostra o código de cores para capacitores e a ordem de interpretação dos algarismos.

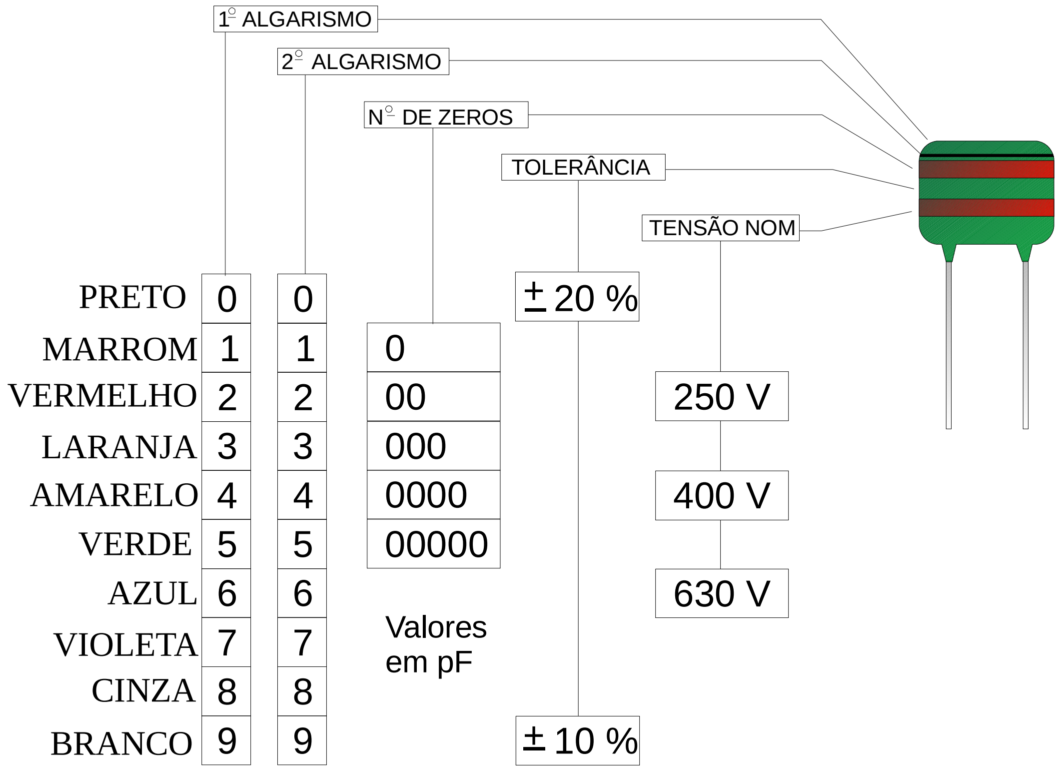


Fig.23 Código de cores para capacitores.

O valor de capacitância expresso pelo código de cores é dado em picofarads (pF).

Exercícios

Especificar os capacitores identificados pelas seguintes cores :

a) Amarelo - Violeta - Laranja - Branco –Azul

b) Laranja - Branco - Amarelo - Branco - Vermelho

Solução

(a) 47nF, ± 10%, 630V

(b) 0,39 µF, ± 10%, 250V

TESTE DE ISOLAÇÃO DO CAPACITOR

Um capacitor em condições normais apresenta entre suas armaduras resistência infinita (isolação) não permitindo assim circulação de corrente.

Mas, quando o dielétrico sofre degeneração, a resistência entre as armaduras diminui permitindo a circulação de uma pequena corrente denominada de corrente de fuga.

Quando se deseja verificar as condições do capacitor quanto à resistência de isolação entre as armaduras utiliza-se normalmente o ohmímetro.

A escolha da escala de ohmímetro depende do valor de capacitância do capacitor a ser testado, conforme ilustrado na **Tabela 3**.

Tabela 3 Teste de isolação de capacitores.

Capacitância	Escala
até 1μF	x10.000
de 1μF a 100μF	x 1.000
acima de 100μF	x 10 ou x1

Para valores de capacitância de até 1μF, a escala recomendada é a x10000 e para valores superiores recomenda-se x100 ou x10.

Após selecionada a escala, conectar as pontas de prova do ohmímetro aos terminais do capacitor. Neste momento o ponteiro deflexiona rapidamente em direção ao zero e logo em seguida retorna mais lentamente em direção ao infinito da escala.

Quando o capacitor está com a isolação em boas condições, o ponteiro deve retornar até o infinito da escala. Deve-se inverter as pontas de prova e repetir o teste.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. O que acontece com um capacitor em descarga ?
2. Quais são os fatores que influenciam na capacitância de um capacitor ?
3. Cite os tipos básicos de capacitores.

BIBLIOGRAFIA

SENAI/DN . **Reparador de circuitos eletrônicos**; Eletrônica Básica I. Rio de Janeiro. (Coleção Básica SENAI, Módulo 1).

VAN VALKENBURG, NOOGER & NEVILLE. **Eletricidade Básica**. Rio de Janeiro, Freitas Bastos, c 1960. 132p. vol.3

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Participar do processo de modernização industrial decorrente da Adoção de novas tecnologias, elegendo prioridades em nível nacional.

Introdução

Em corrente contínua um capacitor atua como um armazenador de energia elétrica. Já em corrente alternada, contudo, o comportamento do capacitor é completamente diferente, devido à troca de polaridade da fonte.

Este fascículo, que tratará do capacitor em CA e associação de capacitores, foi elaborado visando a capacitá-lo a utilizar corretamente o capacitor e suas associações em circuitos de CA.

Para ter sucesso no desenvolvimento do conteúdo e atividades deste fascículo, o leitor já deverá ter conhecimentos relativos a:

- Corrente alternada.
- Capacitores.

Comportamento do capacitor em CA

Os capacitores despolarizados podem funcionar em corrente alternada devido ao fato de que cada uma das suas armaduras pode receber tanto potencial positivo como negativo.

Capacitores despolarizados podem ser ligados em CA.

Os capacitores polarizados não podem ser conectados a CA porque a troca de polaridade provoca danos ao componente.

FUNCIONAMENTO DO CAPACITOR EM CA

Quando um capacitor é conectado a uma fonte de corrente alternada as suas armaduras estão submetidas à troca sucessiva de polaridade da tensão aplicada. A **Fig.1** ilustra este fato.

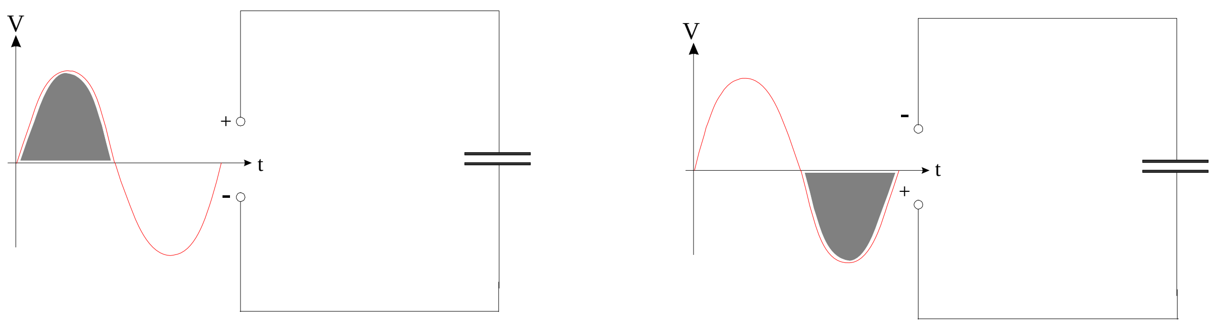


Fig.1 Troca de polaridade das armaduras de um capacitor.

A cada semiciclo, a armadura que recebe potencial positivo entrega elétrons à fonte, enquanto a armadura que está ligada ao potencial negativo recebe elétrons, como ilustrado na **Fig.2**.

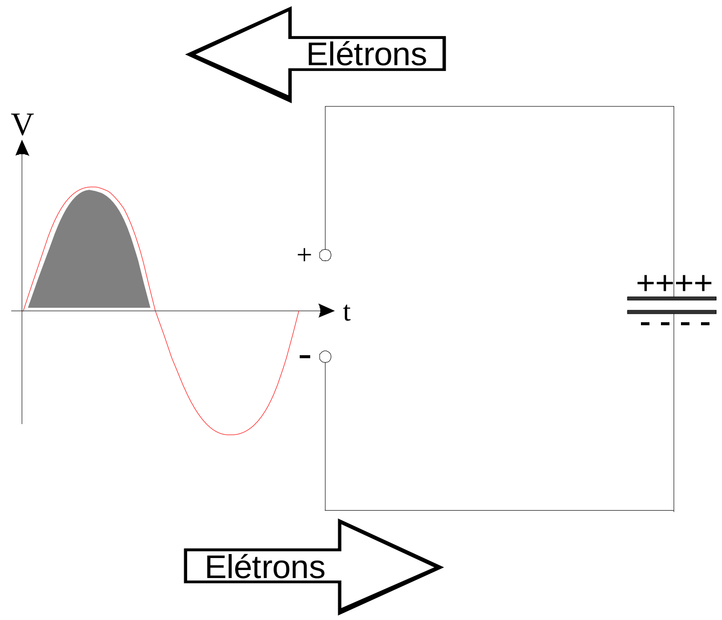


Fig.2 Retirada e entrega de elétrons às armaduras do capacitor.

Com a troca sucessiva de polaridade, uma mesma armadura durante um semiciclo recebe elétrons da fonte e no outro devolve elétrons para a fonte, como mostrado na **Fig.3**.

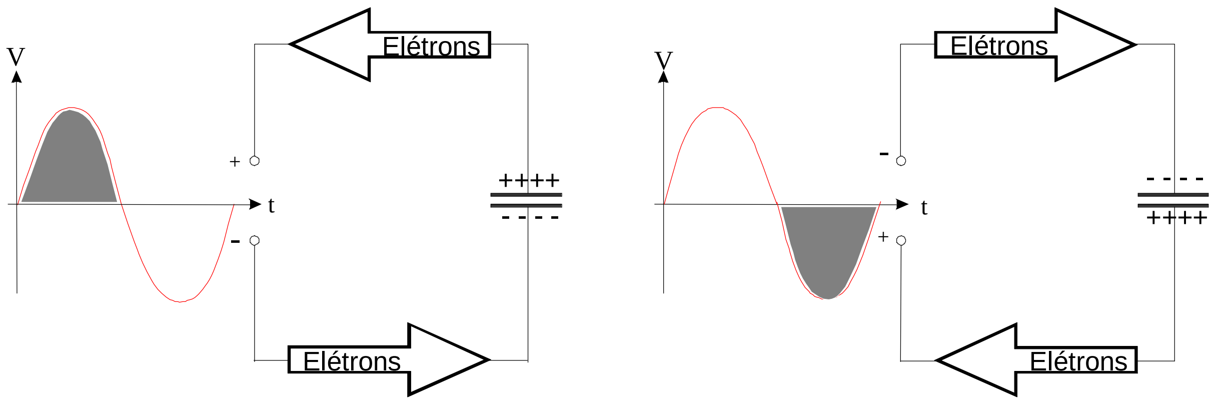


Fig.3 Inversão da polaridade nas armaduras de um capacitor.

Há, portanto, um movimento de elétrons ora entrando, ora saindo da armadura.

Isto significa que circula uma corrente alternada no circuito, embora as cargas elétricas não passem de uma armadura do capacitor para a outra através do dielétrico.

Um capacitor ligado a uma fonte de CA permite a circulação de corrente num circuito.

REATÂNCIA CAPACITIVA

Os processos de carga e descarga sucessivas de um capacitor ligado em CA dá origem a uma resistência à passagem da corrente no circuito. Esta **resistência** é denominada de **reatância capacitiva**.

Reatância capacitiva é a oposição que um capacitor apresenta à circulação de corrente em circuitos de CA.

A reatância capacitiva é representada pela notação X_c e é expressa em ohms.

A reatância capacitiva X_c é expressa pela equação:

$$X_C = \frac{1}{2\pi \times f \times C} \qquad (1)$$

onde

X_c = reatância capacitiva em Ω.

2π = constante (6,28).

f = freqüência da corrente alternada em Hz.

C = capacitância do capacitor em F.

Como a capacitância normalmente não é expressa em Farad e sim em um submúltiplo, pode-se operar a **Eq.(1)** de forma a poder usar o valor do capacitor em μF.

$$X_C = \frac{10^6}{2\pi \times f \times C} \qquad (2)$$

Exemplo 1:

Calcular a reatância de um capacitor de 100nF quando conectado a uma rede de CA de freqüência 60Hz.

Dados :

f = 60Hz
C = 100nF ou 0.1μF

Solução :

$$X_C = \frac{10^6}{2\pi \times f \times C} = \frac{10^6}{2\pi \times 60 \times 0.1}$$

$$X_C = 26.539\Omega$$

FATORES QUE INFLUENCIAM REATÂNCIA CAPACITIVA

Verifica-se através da equação que a reatância capacitiva de um capacitor depende apenas da sua capacitância e da freqüência da rede CA.

A reatância capacitiva de um capacitor depende apenas da sua capacitância e da freqüência da rede CA.

O gráfico da **Fig.4** mostra o comportamento da reatância capacitiva com a variação da freqüência da CA.

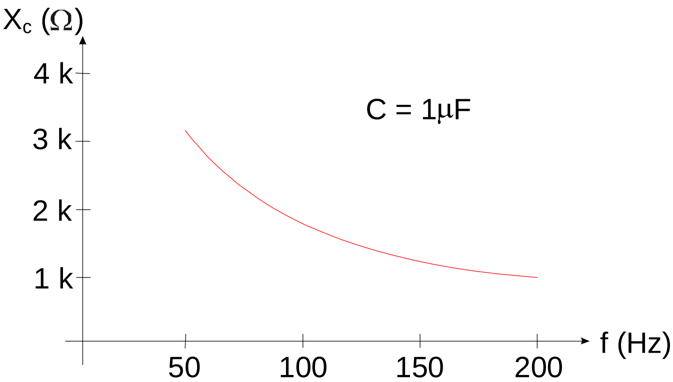


Fig.4 Reatância versus freqüência.

Pelo gráfico, verifica-se que a reatância capacitiva diminui com o aumento da freqüência.

A reatância capacitiva diminui com o aumento da freqüência.

No gráfico da **Fig.5** tem-se o comportamento da reatância capacitiva com a variação da capacitância.

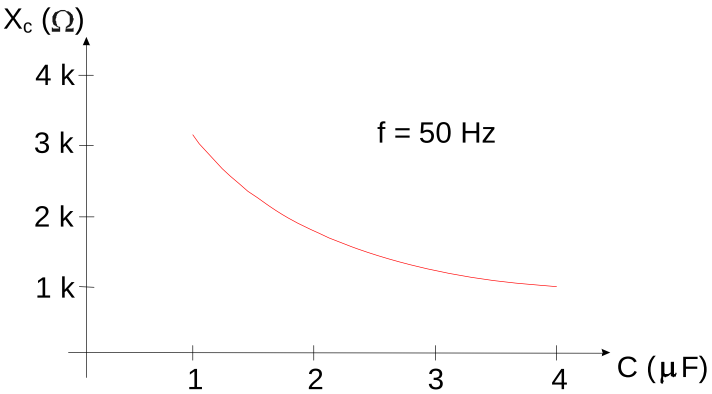


Fig.5 Reatância versus capacitância.

A reatância capacitiva diminui com o aumento da capacitância.

Na equação da reatância não aparece o valor de tensão. Isto significa que a reatância capacitiva é independente do valor de tensão CA aplicada ao capacitor.

A reatância capacitiva não depende do valor de tensão CA aplicada aos terminais do capacitor.

A tensão aplicada ao capacitor irá influenciar apenas na corrente circulante no circuito.

RELAÇÃO ENTRE TENSÃO CA, CORRENTE CA E REATÂNCIA CAPACITIVA.

Quando um capacitor é conectado a uma fonte de CA, estabelece-se um circuito elétrico. Neste circuito estão em jogo três valores:

- Tensão aplicada.
- Reatância capacitiva.
- Corrente circulante.

Esses três valores estão relacionados entre si nos circuitos de CA da mesma forma que nos circuitos de CC, ou seja, através da lei de Ohm, como ilustrado na **Fig.6**.

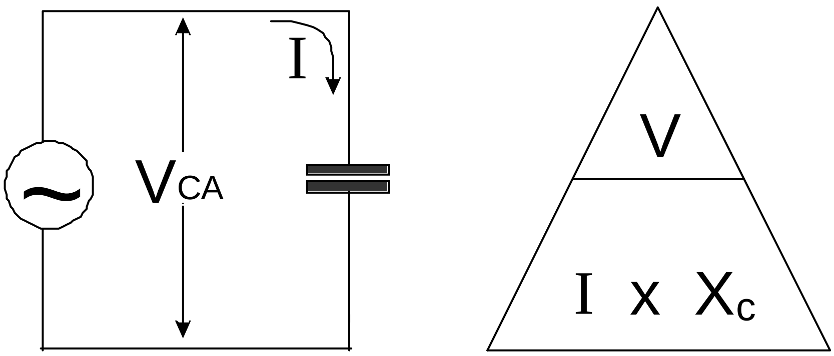


Fig.6 Relação entre tensão aplicada, reatância capacitiva e corrente.

Exemplo 2:

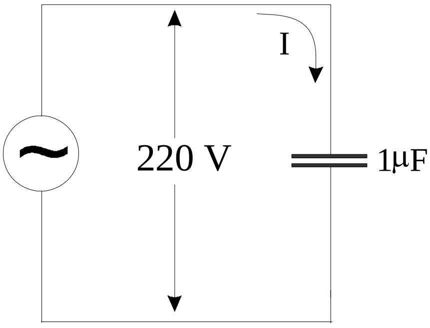
Um capacitor de 1μF é conectado a uma rede de CA 220V e 60Hz. Qual a corrente circulante no circuito?

Solução :

$$X_C = \frac{10^6}{2\pi \times f \times C} = \frac{10^6}{6{,}26 \times 60 \times 1} = 2.653\,\Omega$$

$$I = \frac{V_C}{X_C} = \frac{220}{2.653} = 0{,}0829 \text{ A}$$

$$I = 82{,}9 \text{ mA}$$



Deve-se lembrar que os valores de V e I são eficazes, ou seja, são valores que serão indicados por um voltímetro e um miliamperímetro de CA conectados ao circuito.

Toda vez que se refere à tensão ou corrente em CA, esses valores são eficazes, a menos que se especifique de forma diferente (V_p, V_{pp} ou I_p, I_{pp}).

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA CAPACITÂNCIA DE UM CAPACITOR

Quando a capacitância de um capacitor despolarizado é desconhecida, é possível determiná-la por processo experimental.

Conecta-se o capacitor a uma fonte de CA com tensão e freqüência conhecidos e determina-se a corrente com um amperímetro de CA, como ilustrado na **Fig.7**. O valor de tensão de pico da CA aplicada deve ser inferior à tensão de trabalho do capacitor.

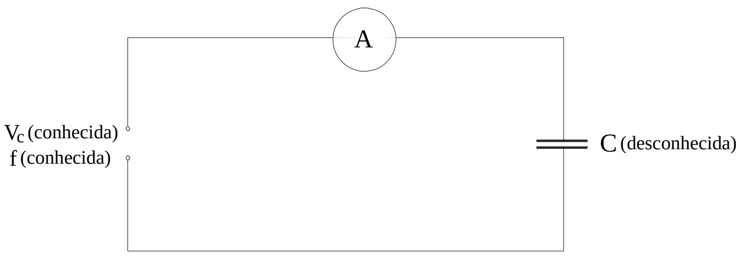


Fig.7 Determinação de uma capacitância experimentalmente.

Conhecendo-se os valores de tensão e corrente no circuito, determina-se a reatância capacitiva do capacitor da seguinte forma :

$$X_C = \frac{V_C}{I_C} \qquad (3)$$

onde

V_c = tensão no capacitor.

I_c = corrente no circuito.

Utilizando os valores disponíveis determina-se a capacitância.

$$C\,(\mu F) = \frac{10^6}{2\pi \times f \times X_c}$$

Este processo também pode ser utilizado para determinação da capacitância de uma associação de capacitores, desde que sejam despolarizados.

Associação de capacitores

Os capacitores, assim como os resistores podem ser conectados entre si formando uma associação em série, paralela ou mista.

As associações paralela e série são encontradas na prática, as mistas dificilmente são utilizados.

ASSOCIAÇÃO PARALELA DE CAPACITORES

A associação paralela de capacitores tem por objetivo obter maiores valores de capacitância.

A **Fig.8** mostra uma associação paralela de capacitores e sua representação simbólica.

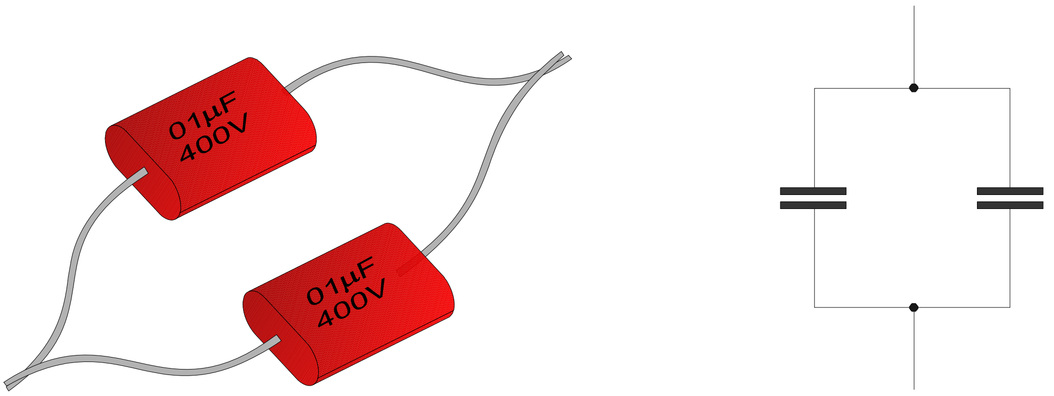


Fig.8 Associação paralela de capacitores.

Esta associação tem características particulares com relação à capacitância total e a tensão de trabalho.

CAPACITÂNCIA TOTAL DA ASSOCIAÇÃO PARALELA

A capacitância total da associação paralela é a soma das capacitâncias individuais.

Matematicamente, a capacitância total de uma associação paralela é dada pela equação:

$$C_T = C_1 + C_2 + \ldots..C_n. \qquad (4)$$

onde

C_T = capacitância total da associação.
C_1 = capacitância de C_1.
C_2 = capacitância de C_2.
C_n = capacitância do capacitor C_n.

Para executar a soma, todos os valores devem ser convertidos à mesma unidade.

Exemplo 3:

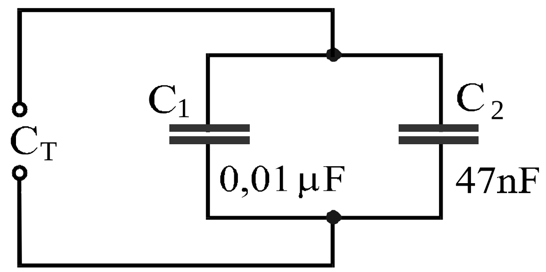
Qual a capacitância total da associação paralela de capacitores mostradas nas figuras abaixo.

Solução :

$C_T = C_1 + C_2$

$C_T = 0{,}01\mu F + 0{,}047\mu F$

$C_T = 0{,}057\mu F$ ou $C_T = 57nF$

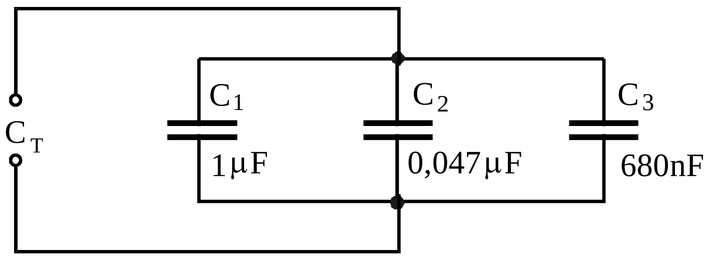


Solução :

$C_T = C_1 + C_2 + C_3$

$C_T = 1\mu F + 0{,}047\mu F + 0{,}68\mu F$

$C_T = 1{,}727\mu F$



TENSÃO DE TRABALHO DA ASSOCIAÇÃO PARALELA

Considere todos os capacitores associados em paralelo da **Fig.9**. Eles recebem a mesma tensão aplicada ao conjunto.

$$V_{c_1} = V_{c_2} = V_{c_3} = 10V$$

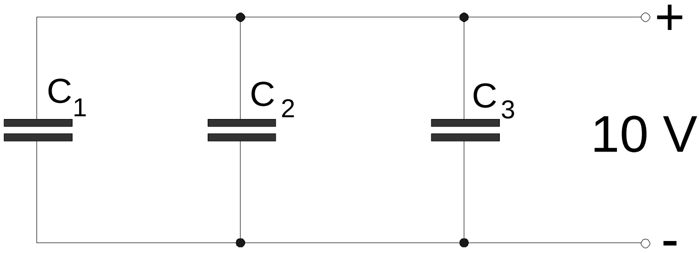
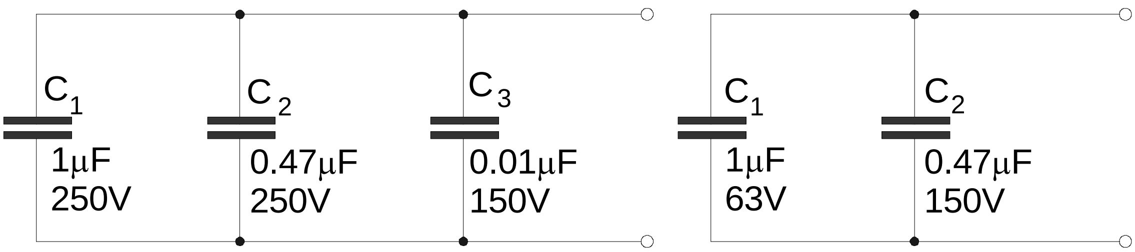


Fig.9 Capacitores em paralelo recebendo a mesma tensão de 10V.

Assim, a máxima tensão que pode ser aplicada a uma associação paralela **é a daquele capacitor que tem menor tensão de trabalho.**

Exemplo 4:

Qual a máxima tensão que pode ser aplicada nas associações apresentadas nas figuras a seguir?



Solução :

As tensões máximas são 150V e 63V, respectivamente.

É importante lembrar ainda dois aspectos:

- Deve-se evitar aplicar a um capacitor a tensão máxima que este suporta.
- Em CA, a tensão máxima é a tensão de pico. Um capacitor com tensão eficaz máxima de 70V (70V eficazes correspondem a uma tensão CA com pico de 100V).

ASSOCIAÇÃO PARALELA DE CAPACITORES POLARIZADOS

Ao se associarem capacitores polarizados em paralelo, os terminais positivos dos capacitores devem ser ligados em conjunto entre si e os negativos da mesma forma, como mostrado na **Fig.10**

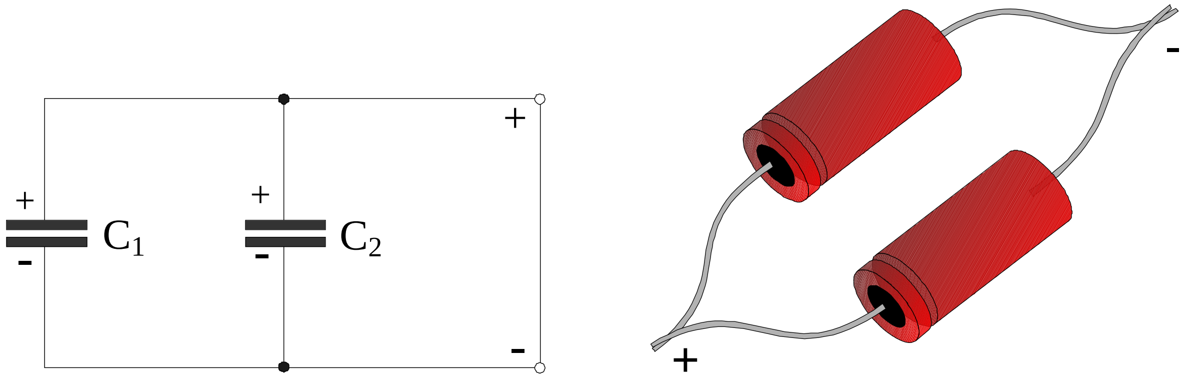


Fig.10 Associação paralela de capacitores polarizados.

Na associação paralela de capacitores: (1) a capacitância total é a soma das capacitâncias individuais, (2) a tensão máxima da associação é a do capacitor com menor tensão de trabalho e (3) ao associarem-se capacitores polarizados, os terminais de mesma polaridade são ligados entre si.

Deve-se lembrar que capacitores polarizados só podem ser utilizados em CC, porque **não há troca de polaridade da tensão**.

ASSOCIAÇÃO SÉRIE DE CAPACITORES

A associação série de capacitores tem por objetivo obter capacitâncias menores ou tensões de trabalho maiores.

A **Fig.11** mostra uma associação série de dois capacitores e sua representação simbólica.

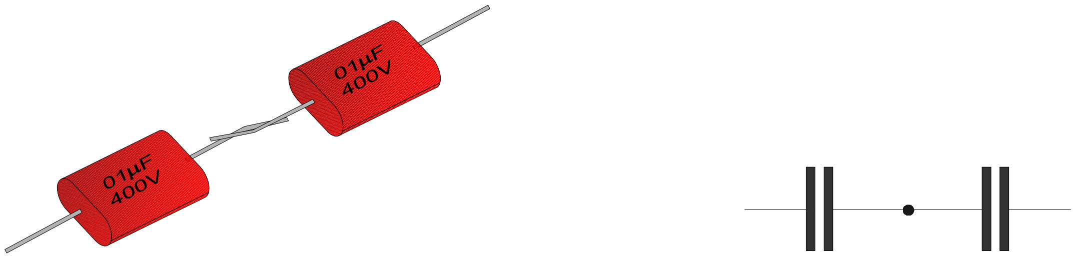


Fig.11 Associação série de capacitores.

CAPACITÂNCIA DA ASSOCIAÇÃO SÉRIE

Quando se associam capacitores em série, a capacitância total é menor que o valor do menor capacitor associado.

A capacitância total de uma associação série é dada pela equação:

$$C_T = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \ldots + \frac{1}{C_n}} \qquad (5)$$

Esta equação pode ser desenvolvida (como a equação da resistência equivalente de resistores em paralelo) para duas situações particulares:

ASSOCIAÇÃO SÉRIE DE DOIS CAPACITORES C_1 E C_2

$$C_T = \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2} \qquad (6)$$

onde C_T é a capacitância total da associação.

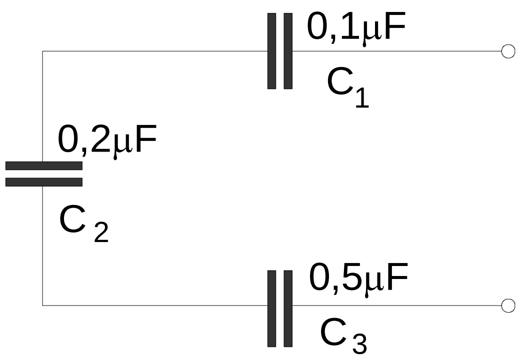
ASSOCIAÇÃO SÉRIE DE "N" CAPACITORES DE MESMO VALOR

$$C_T = \frac{C}{n} \qquad (7)$$

Para a utilização das equações, todos os valores de capacitância devem ser convertidos para a mesma unidade.

Exemplo 5:

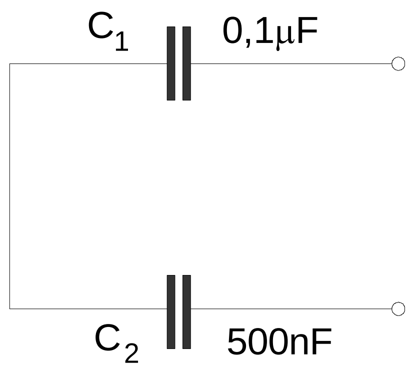
Determinar a capacitância total dos circuitos abaixo



Solução :

$$C_T = \frac{1}{\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}} = \frac{1}{\frac{1}{0,1}+\frac{1}{0,2}+\frac{1}{0,5}}$$

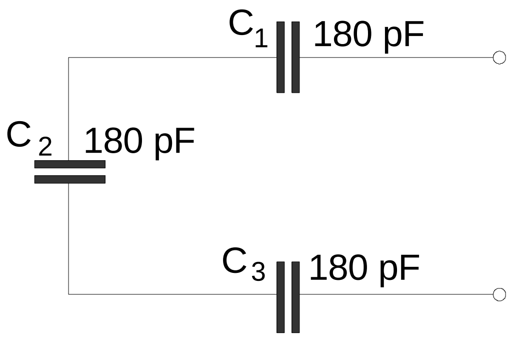
$$C_T = \frac{1}{17} = 0,059\mu F$$



Solução :

$$C_T = \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2} = \frac{0,1 \times 0,5}{0,1 + 0,5}$$

$C_T = 0.083\ \mu F$



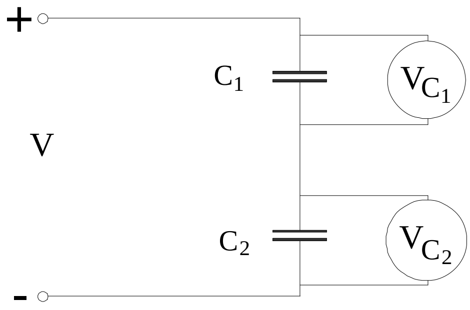
Solução :

$$C_T = \frac{C}{n} = \frac{180}{3}$$

$C_T = 60pF$

TENSÃO DE TRABALHO DA ASSOCIAÇÃO SÉRIE

Quando se aplica uma tensão a uma associação série de capacitores a tensão aplicada se divide entre eles, como ilustrado na **Fig.12**.



$$V_{C_1} + V_{C_2} = V$$

Fig.12 Tensão em uma associação série.

A distribuição da tensão nos capacitores ocorre de forma inversamente proporcional à capacitância, ou seja:

- Uma maior capacitância corresponde a uma menor tensão.
- Uma menor capacitância corresponde a uma maior tensão.

***Em uma associação série de capacitores, a tensão se distribui de forma inversamente proporcional à capacitância dos capacitores. O capacitor de menor capacitância fica com a maior parcela da tensão total*.**

A determinação do valor de tensão em cada capacitor de uma associação série é feita através das equações da eletrostática.

Como forma de simplificação, pode-se adotar um procedimento simples e que evita a aplicação de tensões excessivas a uma associação série de capacitores.

Esse procedimento consiste em se associarem em série capacitores de mesma capacitância e mesma tensão de trabalho.

Desta forma, a tensão aplicada se distribui igualmente sobre todos os capacitores. A **Fig.13** ilustra este procedimento.

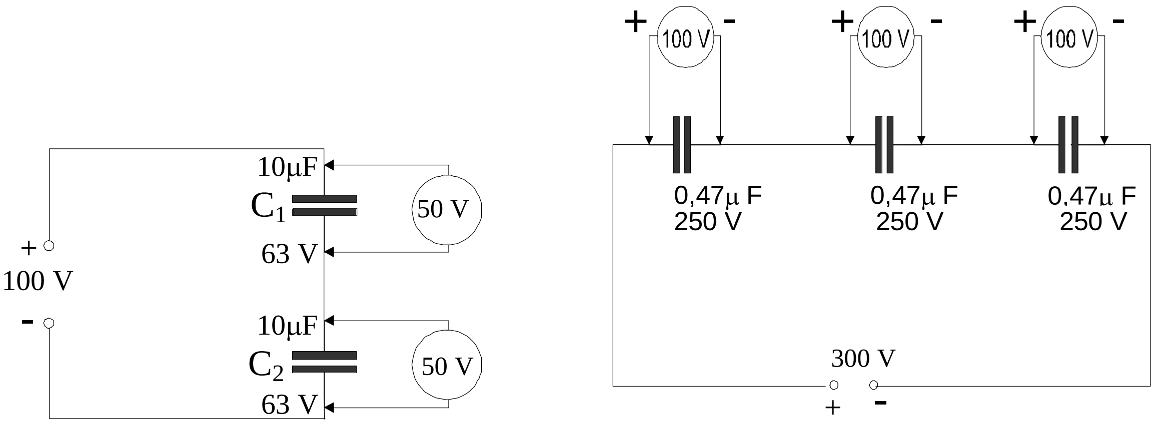


Fig.13 Associação série de capacitores de mesma tensão.

ASSOCIAÇÃO SÉRIE DE CAPACITORES POLARIZADOS

Ao se associarem capacitores polarizados em série, o terminal positivo de um capacitor é conectado ao terminal negativo do outro, como mostrado na **Fig14**.

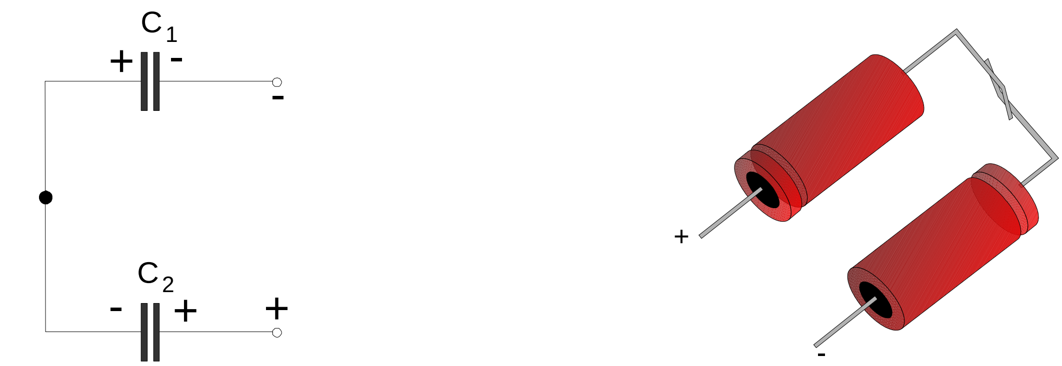


Fig.14 Associação série de capacitores polarizados.

É importante lembrar que capacitores polarizados só podem ser ligados em CC.

Na associação série de capacitores, (1) a capacitância total é sempre menor que a capacitância de menor valor e (2) ao se associarem capacitores polarizados em série, a armadura positiva de um capacitor é conectada à armadura negativa do capacitor seguinte.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Quais os tipos de capacitores podem ser ligados em CA ?

2. O que se entende por reatância capacitiva e de que ela depende ?

3. Como se determina a capacitância total de um arranjo de capacitores ligados em paralelo ?

BIBLIOGRAFIA

DEGEM SYSTEMS. **Eletrônica elementar**. Israel, Eletrônica Modular Pantec, c1976, 141p. ilust.

MARCUS, ABRAHAM. **Eletricidade Básica**. Trad. de Ernest Muhr. São Paulo, Importadora de livros, c1964. 194p. ilust.

SENAI/Departamento Nacional. **Impedância**. Rio de Janeiro, Divisão de Ensino e Treinamento, 1980, 91p. (Módulo Instrucional: Eletricidade - Eletrotécnica, 18).

VAN VALKENBURG, NOOGER & NEVILLE. **Eletricidade Básica**. Trad. J.C.C. Walny e outros. Rio de Janeiro, Freitas Bastos, c1971. vol.3 ilust.

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Nosso negócio

Educação para o Trabalho e Cidadania.

Introdução

Nos circuitos onde existem apenas tensões contínuas a tarefa de analisar e compreender seu funcionamento não representa grande dificuldade, tendo em vista que os valores são estáticos e podem ser medidos a qualquer momento.

Já nos circuitos alimentados por CA ou onde existem sinais alternados a análise tende a tornar-se mais trabalhosa, devido ao fato de os valores de tensão e corrente estarem em constante modificação.

Por essa razão é comum representar os parâmetros elétricos de um circuito de CA através de fasores, o que simplifica principalmente a determinação de valores através de cálculos.

Este fascículo, que tratará da defasagem entre grandezas CA, de fasores e da representação fasorial de parâmetros elétricos CA, tem por objetivo fornecer as informações necessárias para que o leitor use os fasores como “ferramenta” para simplificar a análise de circuitos de CA.

É importante que o conteúdo deste fascículo seja bem assimilado porque será utilizado amplamente nos fascículos que seguem.

Para ter sucesso no desenvolvimento do conteúdo deste fascículo, o leitor já deverá ter conhecimentos relativos a:

- Tensão e corrente alternada.

Relação de fase entre grandezas CA

A relação de fase é uma comparação entre os momentos em que os fenômenos elétricos acontecem. Pode-se, por exemplo, estabelecer uma relação de fase entre duas tensões CA de mesma freqüência. Para isto, escolhe-se um momento como ponto de referência, normalmente o pico do ciclo positivo (ou negativo) de uma das tensões CA, como mostrado na **Fig.1**.

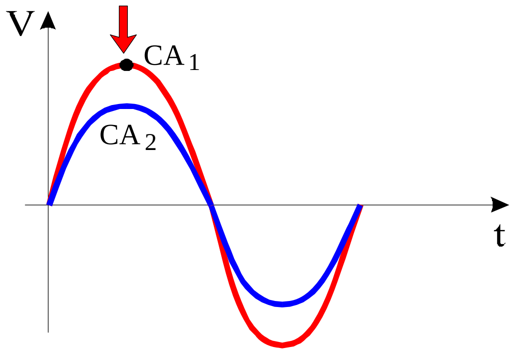


Fig.1 Ponto de referência da tensão alternada CA_1.

Verifica-se em seguida a outra tensão no circuito neste mesmo momento, conforme mostrado na **Fig.2**.

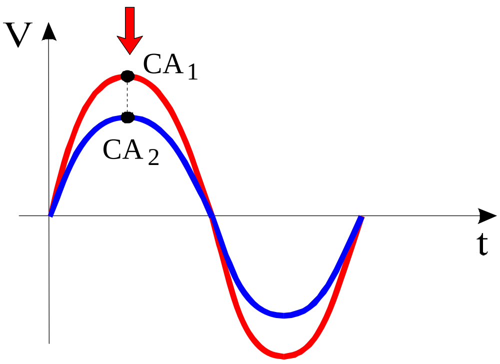
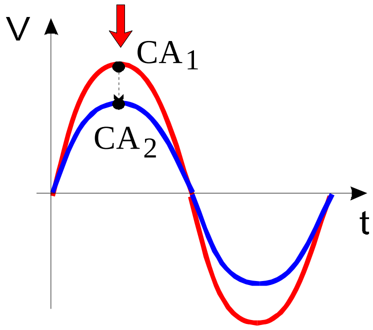
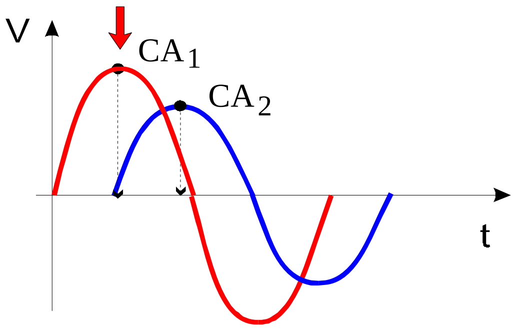


Fig.2 Tensão CA_2 no mesmo momento que ocorre o pico na tensão CA_1.

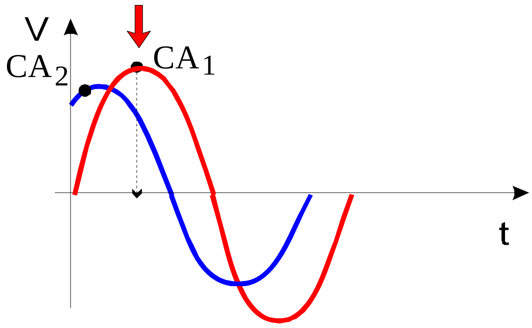
Ao se comparar a segunda tensão CA_2 com a tensão CA_1 de referência, pode ocorrer uma das três situações apresentadas graficamente na **Fig.3**.



(a)



(b)



(c)

Fig.3 Posições possíveis do pico de tensão do semiciclo positivo de uma tensão CA com respeito a uma tensão de referência.

Na situação (a), o pico positivo da tensão CA_1 coincide com o pico positivo da tensão CA_2 no mesmo instante.

Nesta situação, diz-se que as tensões CA_1 e CA_2 estão em fase.

Duas tensões CA estão em fase quando seus picos positivos e negativos ocorrem ao mesmo tempo.

Nas outras duas situações (b) e (c), as tensões CA_1 e CA_2 atingem os valores máximos (picos positivos e negativos) em instantes diferentes.

Quando isto ocorre, diz-se que as tensões CA_1 e CA_2 estão defasadas.

Duas tensões CA estão defasadas quando seus picos (positivos ou negativos) ocorrem em momentos diferentes.

Observando os gráficos em que as tensões CA_1 e CA_2 estão defasadas, verifica-se que estes gráficos apresentam diferenças entre si.

No gráfico da **Fig.3b**, o ponto de referência da tensão CA_1 (pico positivo), ocorre antes do pico positivo da tensão CA_2. A tensão CA_2 atingirá o pico positivo depois da CA_1. Neste caso, diz-se que a tensão CA_2 está **atrasada** com relação a CA_1 ou a tensão CA_1 está **adiantada** com relação a CA_2.

No gráfico da **Fig.3c**, a tensão CA_1 atingirá o pico positivo depois da CA_2. Neste caso, diz-se que a tensão CA_2 está adiantada em relação a tensão CA_1 ou a tensão CA_1 está **atrasada** em relação a tensão CA_2.

Ângulo de defasagem entre grandezas CA

O adiantamento ou atraso de uma tensão CA em relação a outra é dado em graus (º). Um ciclo completo de uma CA corresponde a 360º, como mostrado na **Fig.4**.

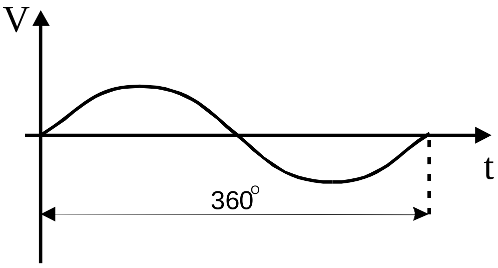


Fig.4 Ciclo completo de uma CA.

Por conseqüência, como mostrado na **Fig.5**, tem-se que: um semiciclo de uma CA tem 180º, meio semiciclo de uma CA tem 90º e um quarto de semiciclo de uma CA tem 45º.

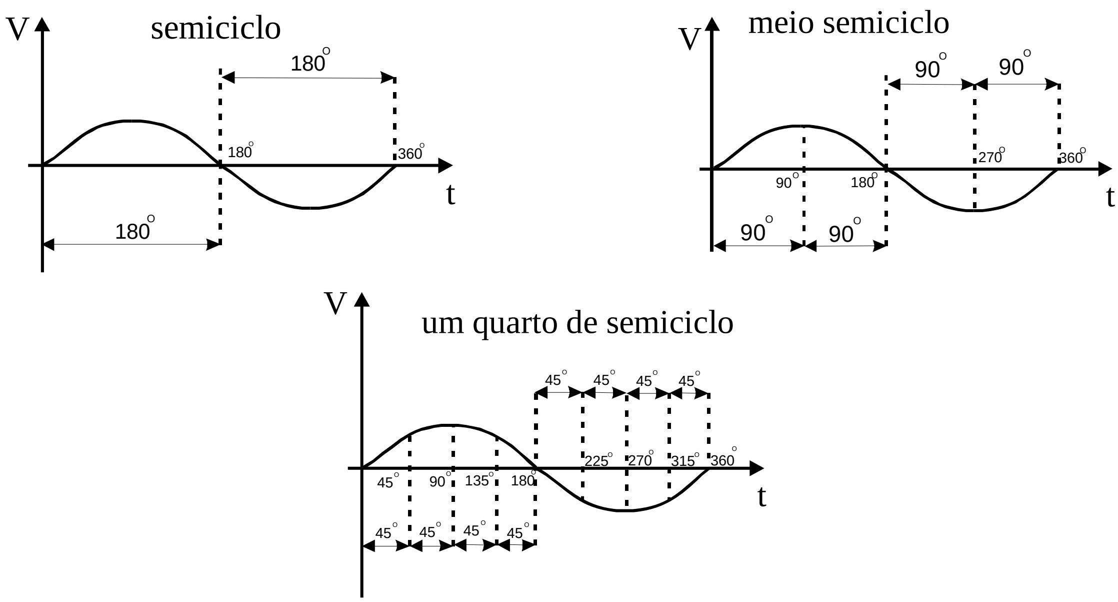


Fig.5 Subdivisões de um ciclo de uma CA.

Com base nesta divisão do eixo horizontal, pode-se determinar de quantos graus é a defasagem entre uma tensão CA e a outra.

As **Figs. 6, 7, 8** mostram exemplos de tensões CA defasadas.

pico positivo de CA_1 : 90º

pico positivo de CA_2 : 180º

defasagem : 180º - 90º = 90º

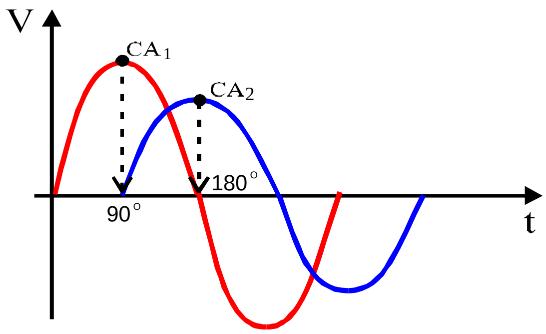


Fig.6 CA_2 está atrasada 90º com relação a CA_1.

pico positivo de CA_1 : 135º

pico positivo de CA_2 : 90º

defasagem : 135º - 90º= 45º

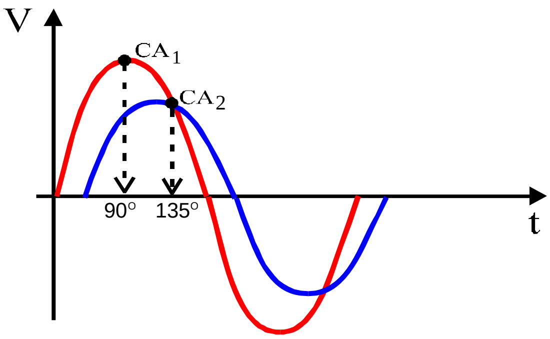


Fig.7 CA_1 está atrasada 45º em relação a CA_2.

pico positivo de CA_1 : 60º

pico positivo de CA_2 : 200º

defasagem : 140º

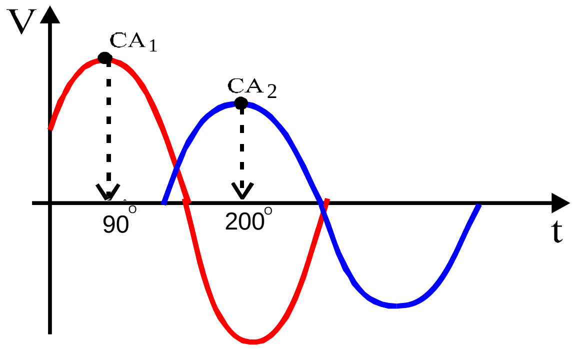


Fig. 8 CA_2 está atrasada 140º em relação a CA_1.

Existe ainda um caso particular de defasagem, como mostrado na **Fig.9**.

pico positivo de CA_1 : 90º

pico positivo de CA_2 : 270º

defasagem : 180º

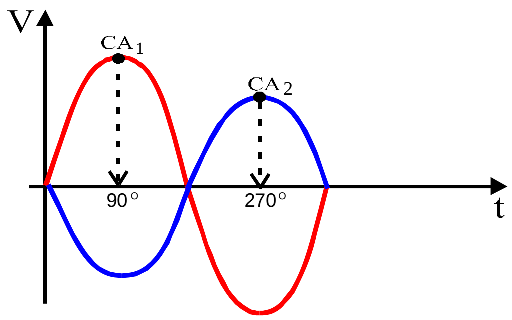


Fig. 9 CA_1 e CA_2 em oposição de fase

Neste caso, diz-se apenas que CA_1 está em **oposição de fase** com CA_2 ou que CA_1 e CA_2 estão em **anti-fase**.

Vetores

Existem grandezas que podem ser expressas simplesmente por um número e uma unidade. Por exemplo, quando se diz que a temperatura em um determinado momento é de 20° C, a informação que se quer dar é perfeitamente compreensível. Este tipo de grandeza é chamada de **grandeza escalar**. Alguns exemplos de grandezas escalares são: o tempo, a distância e a massa.

Para algumas grandezas, entretanto, um número e uma unidade não são suficientes.

Suponha a seguinte atuação: em meio a uma guerra, um general envia a seguinte mensagem ao comandante da tropa que está no fronte de batalha: ***“desloque o seu regimento 6km do ponto atual o mais breve possível”.***

O comandante certamente ficará em situação difícil, pois a mensagem não diz se o deslocamento deve ser para o norte, sul, leste oeste ou mesmo para direções intermediárias.

Pelo exemplo, conclui-se que para definir um deslocamento não é suficiente dizer apenas de quanto este deve ser.

Grandezas como o deslocamento são denominadas de **grandezas vetoriais**. Outros exemplos de grandezas vetoriais são: a força, a velocidade e o campo elétrico.

Para a perfeita determinação de uma grandeza vetorial são necessárias três informações:

- Um valor numérico, denominado de módulo.
- Uma direção.
- Um sentido.

Assim, o comandante não teria tido dúvidas se a mensagem do general fosse: “Desloque o seu regimento 6km do ponto atual, na direção norte - sul, sentido do sul o mais breve possível”.

Uma grandeza vetorial pode ser representada graficamente através de um segmento de reta orientada denominado de **vetor**.

A **Fig. 10** mostra alguns vetores.

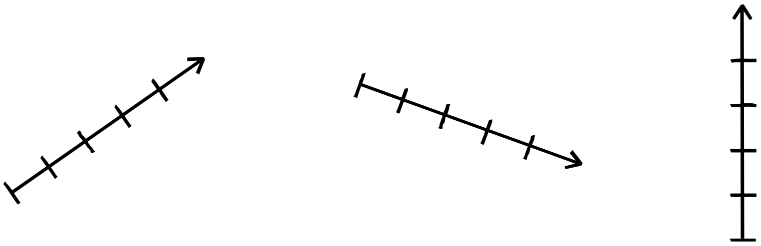


Fig.10 Vetores.

Como se pode observar, em qualquer um dos vetores da **Fig.10,** esta representação gráfica fornece as três informações necessárias a respeito da grandeza vetorial.

A **Fig.11** mostra um vetor e sua reta suporte com a indicação de seu módulo, sua direção e seu sentido.

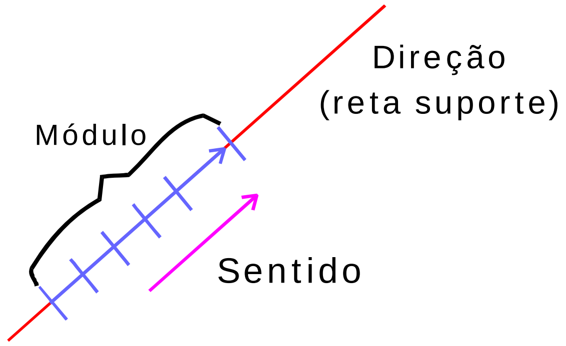


Fig.11 Módulo, direção e sentido de um vetor.

Os vetores constituem-se em fator de simplificação na análise de situações diárias.

Supondo-se, por exemplo, que alguém deseje levar uma mesinha com a televisão do canto esquerdo da sala para o canto direito e está pensando em como fazê-lo, como ilustrado na **Fig.12**. Intuitivamente, qualquer pessoa sabe que terá que empurrar ou puxar a mesinha com uma determinada força para que isto aconteça.

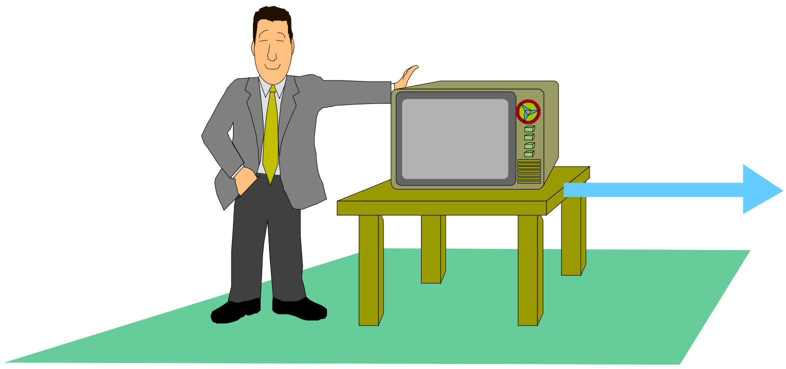


Fig.12 Deslocamento de uma mesa.

Esta força pode ser representada através do vetor da **Fig.13**.

- Módulo: valor numérico da força para movimentar a mesinha.
- Direção: horizontal.
- Sentido: da esquerda para direita.

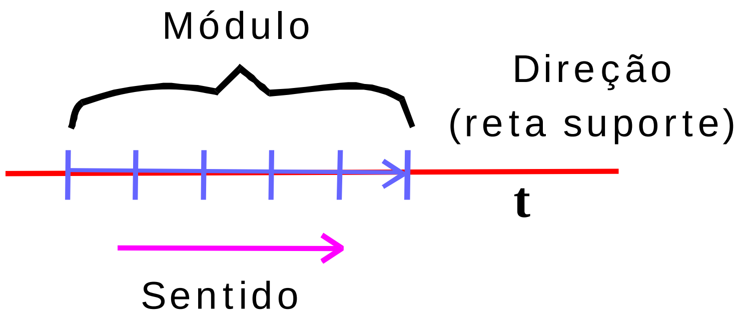


Fig.13 Vetor força.

RESULTANTE DE UM SISTEMA DE VETORES

Em muitas situações existe mais de uma força atuando sobre o mesmo ponto ao mesmo tempo. Nestes casos, empregar uma representação gráfica simplifica a determinação de uma solução.

Suponha, por exemplo, que uma pessoa precise puxar a caixa pesada ilustrada na **Fig.14**. Ao tentar, esta pessoa conclui que sozinha não consegue movimentar a caixa.

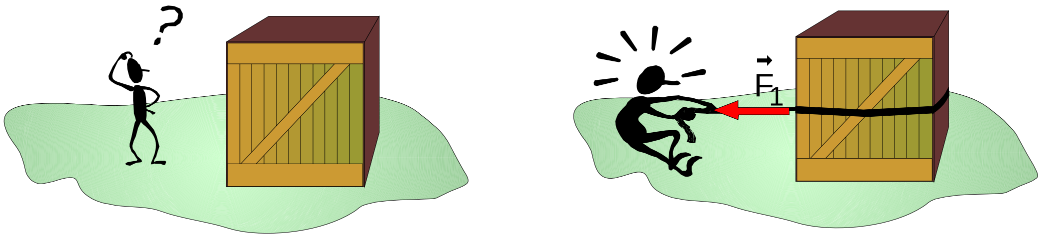


Fig.14 Deslocamento de uma caixa pesada.

A solução é pedir ajuda, incluindo mais uma força no sistema. Naturalmente esta segunda força tem que atuar na mesma direção e sentido e no mesmo ponto de aplicação que a primeira para que o resultado (resultante) seja o desejado.

A resultante, neste caso, será a soma das duas forças, atuando na mesma direção e sentido das forças individuais.

A **Fig.15** mostra a representação completa do sistema de forças e sua resultante.

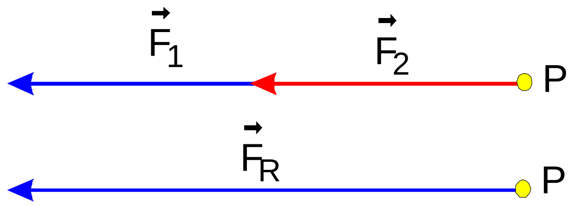


Fig.15 Sistema de forças e sua resultante.

Então, pode-se afirmar que se duas forças F_1 e F_2 aplicadas no mesmo ponto e atuando tem na mesma direção e mesmo sentido, o vetor resultante tem as seguinte características:

- Módulo: F_1+F_2.
- Direção: a da reta que contém as duas forças.
- Sentido: o mesmo das forças.

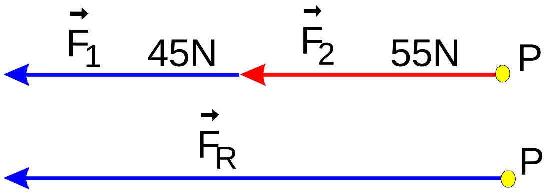
Exemplo 1:

Duas pessoas puxam, na mesma direção e sentido uma corda presa a uma carga. A primeira exerce uma força de 45N e a segunda uma força de 55N. Qual o módulo, a direção e o sentido da força resultante?

Observação: Newton (N) é a uma unidade de medida de força.

Solução:

Desenhando-se o diagrama vetorial, tem-se que:



Módulo do vetor resultante: F_R = 45N + 55N = 100N
Direção do vetor resultante: a mesma das forças aplicadas (horizontal).
Sentido do vetor resultante: o mesmo das forças aplicadas (direita para esquerda).

Em algumas situações, as forças de um sistema têm a mesma direção, mas sentidos opostos.

Imagine, por exemplo, a brincadeira de "cabo de guerra" mostrada na **Fig.16**.

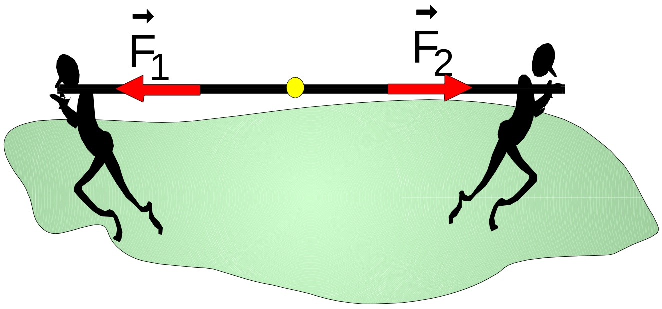


Fig.16 "Cabo de guerra".

Este é um exemplo típico de sistema onde as forças atuam na mesma direção (a da corda) e em sentidos opostos.

Considerando a corda como ponto de aplicação das forças, o sistema pode ser representado conforme a **Fig.17**.

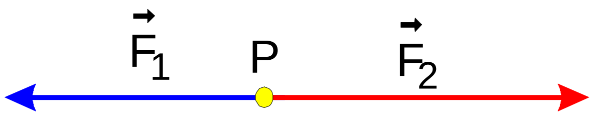


Fig.17 Diagrama vetorial do "cabo de guerra".

A resultante neste caso, será o resultado da subtração de uma força da outra, com a direção mantida (a da corda) e o sentido da força maior, como mostrado na **Fig.18**.

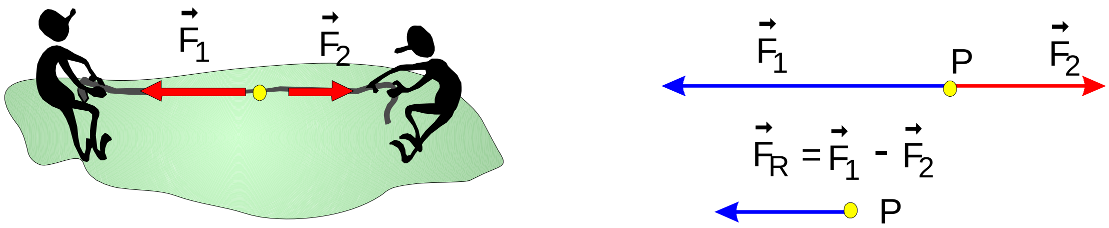


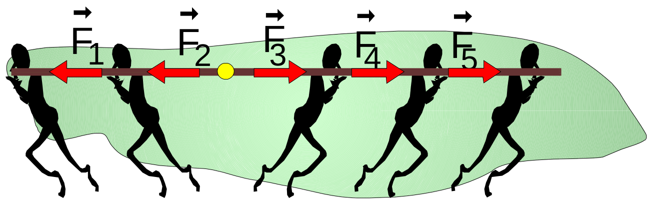
Fig.18 Forças em direções opostas.

Se duas forças F_1 e F_2 aplicadas ao mesmo ponto atuam na mesma direção e em sentidos opostos, têm-se para a resultante que:

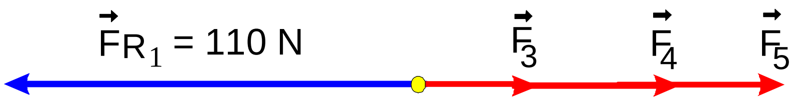
Módulo: F_1 - F_2 (a maior menos a menor).
Direção: a da reta que contém as duas forças.
Sentido: o da força maior.

<u>Exemplo 2</u>:

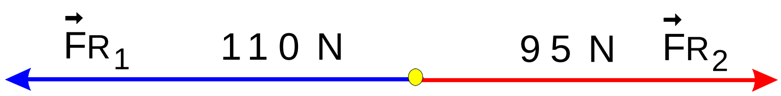
Determinar a resultante do sistema de forças da figura abaixo.



Primeiro, verifica-se que F_1 e F_2 atuam na mesma direção e sentido, podendo ser substituídas por uma resultante parcial FR_1.



Da mesma forma pode ser feito com F_3, F_4 e F_5, substituindo por uma resultante parcial FR_2.



Agora é possível determinar a resultante do sistema FR como sendo :

FR = 110N-95N = 15N.
Direção = a da corda (horizontal).
Sentido = o da maior força (para a esquerda).

Existe ainda uma terceira situação em que forças aplicadas no mesmo ponto não têm a mesma direção.

Supondo-se, por exemplo, dois rebocadores puxando um transatlântico através de dois cabos, conforme mostrado na **Fig.19**.

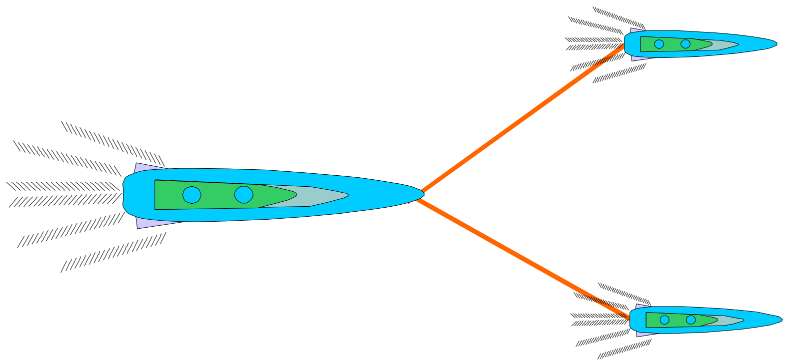


Fig.19 Transatlântico puxado por dois cabos.

O ponto de aplicação das forças é o mesmo (o transatlântico), porém as direções são diferentes, como pode ser visto na **Fig. 20**.

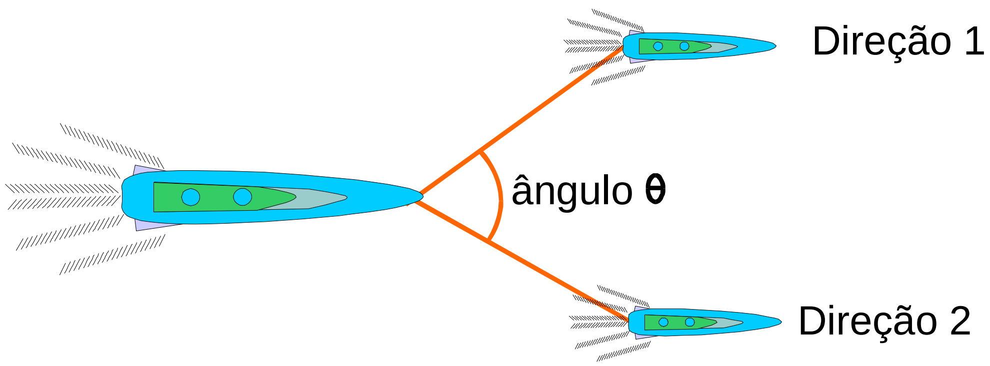


Fig. 20 Ângulo entre as forças produzidas pelos rebocadores.

Neste caso a forma mais simples de encontrar a solução é a forma gráfica pela **Regra do Paralelogramo**.

Deve-se colocar em um papel os dois vetores, desenhados em escala com o ângulo correto entre eles, como mostrado na **Fig.21**.

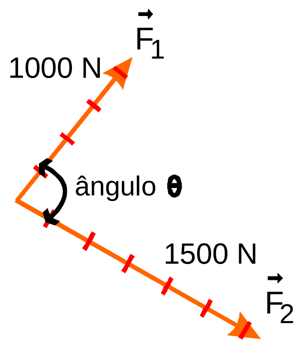


Fig.21 Diagrama vetorial da situação mostrada na **Fig.19**.

Então, traça-se pela extremidade de cada um dos vetores dados uma linha tracejada, paralela ao outro, como mostrado na **Fig.22**.

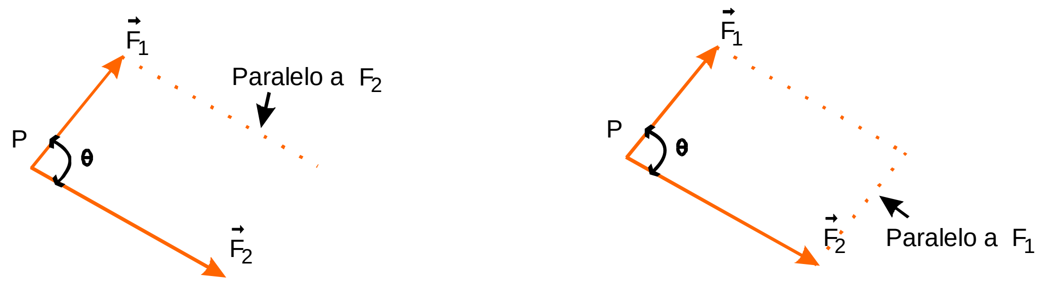


Fig.22 Aplicação da regra do paralelogramo.

Forma-se assim um paralelogramo cuja diagonal é a resultante, conforme ilustrado na **Fig.23**.

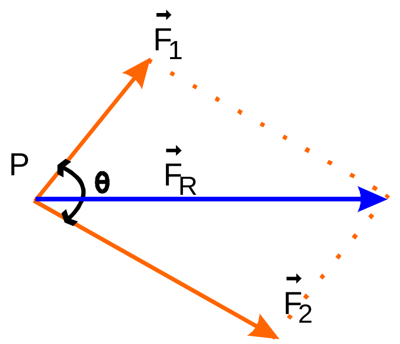


Fig.23 Formação gráfica da resultante.

Medindo-se a resultante com a mesma escala usada para os vetores componentes, tem-se o módulo da resultante.

A direção e o sentido ficam estabelecidos automaticamente no traçado gráfico.

Um caso particular desta situação é quando há um ângulo de 90º entre as forças. A **Fig.24** mostra esta situação.

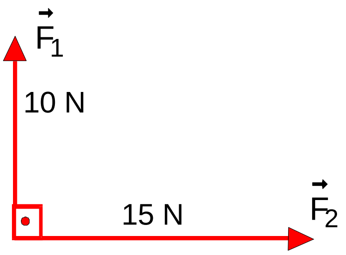


Fig.24 Aplicação de duas forças que formam um ângulo de 90°.

A resolução gráfica da **Fig.24** mostra que o paralelogramo formado é um retângulo onde a resultante é diagonal, como mostrado na **Fig.25**.

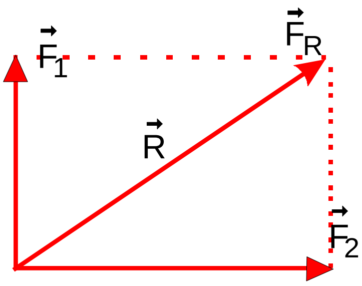


Fig.25 Força resultante.

Trocando-se um dos vetores de posição, forma-se um triângulo retângulo em que F_1 e F_2 são os catetos e R é a hipotenusa, como mostrado na **Fig.26**.

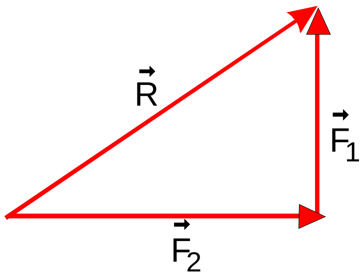


Fig.26 Triângulo retângulo tendo a hipotenusa como resultante.

Neste caso, o módulo dos vetores se relacionam segundo o teorema de Pitágoras:

$$R^2 = F_1^2 + F_2^2 \qquad (1)$$

Se duas forças F_1 e F_2 aplicadas ao mesmo ponto formam um ângulo de 90º entre si, a resultante é dada pelo teorema de Pitágoras, ou seja: $\mathbf{R = \sqrt{(F_1)^2 + (F_2)^2}}$ **.**

O ângulo formado entre os vetores componentes e o resultante é dado pelas relações trigonométricas.

$$\text{sen}\,\theta = \frac{F_1}{R} \qquad (2)$$

$$\cos\theta = \frac{F_2}{R} \qquad (3)$$

<u>Exemplo 3</u>:

Dois rebocadores de 15.000N cada um traciona um transatlântico. Sabendo-se que o ângulo entre os cabos dos dois é de 90º, determinar o módulo da resultante e o ângulo desta com relação ao rebocador.

<u>Solução</u>:

$$R = \sqrt{F_1^{\ 2} + F_2^{\ 2}} = \sqrt{\mathbf{15.000^2 + 15.000^2}} = 21.213\text{N}$$

$$\cos\theta = \frac{F_1}{R} = \frac{15000}{21213} = 0.707$$

$$\theta = 45°$$

O transatlântico se deslocará em uma trajetória que forma um ângulo de 45º com o cabo do rebocador 1.

Fasores

A análise do comportamento e dos parâmetros de um circuito em CA apresenta certas dificuldades porque os valores de tensão e corrente estão em constante modificação.

Mesmo os gráficos senoidais, que podem ser utilizados com este objetivo, tornam-se complexos quando há várias tensões ou correntes envolvidas com defasagem entre si.

Por este motivo é muito comum empregar gráficos fasoriais em substituição aos senoidais.

Do mesmo modo que o comprimento de um segmento de reta, a sua direção e a sua orientação no espaço representam uma série de grandezas físicas, chamadas então de grandezas vetoriais, existe também uma forma de representar graficamente as grandezas tensão e corrente elétrica senoidais.

Por exemplo, a tensão alternada

$$V(t) = V_m \cos(\omega t + \phi) \quad (4)$$

de amplitude V_m, frequência angular ω (rads/s) e fase ϕ (rad ou graus) pode ser representada no plano cartesiano como mostrado na **Fig. 27**.

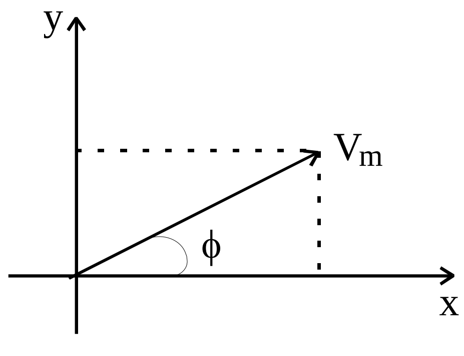


Fig. 27 Representação fasorial de uma tensão alternada.

O estudo dos números complexos nos revela que esta é a representação do número $V_m\ e^{j\phi}$, que na teoria dos circuitos elétricos recebe o nome especial de fasor.

Note que na representação fasorial da tensão senoidal $V(t) = V_m \cos(\omega t + \phi)$, apenas a amplitude da tensão V_m e o ângulo de fase ϕ são especificados, devendo então a frequência angular ser fornecida a parte.

A representação fasorial de uma tensão ou corrente alternada é muito útil, pois nos possibilita visualizar o comportamento relativo dessas grandezas.

Nos gráficos fasoriais, um segmento de reta pode ser usado para representar a tensão ou corrente eficaz correspondente a uma CA senoidal. A **Fig.28** ilustra este princípio.

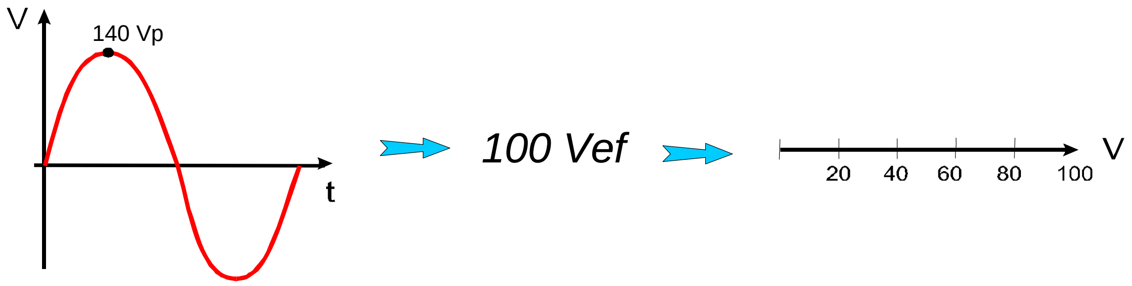


Fig.28 Representação fasorial de uma onda senoidal.

O sistema de gráficos fasoriais permite a representação de qualquer número de tensões com quaisquer defasagens. O ângulo de defasagem entre as tensões CA é representado graficamente por um ângulo entre os fasores.

REPRESENTAÇÃO FASORIAL DE GRANDEZAS SENOIDAIS EM FASE

Quando duas CA estão em fase, pode-se dizer que o ângulo de defasagem entre elas é 0º. A **Fig.29** mostra um exemplo.

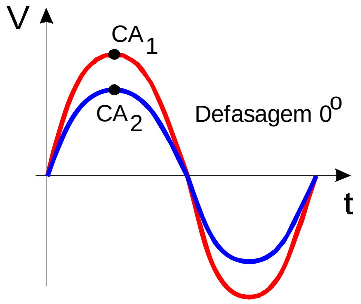


Fig.29 Exemplo de duas tensões alternadas em fase.

Esta situação pode ser representada fasorialmente, considerando-se três aspectos:

- Um segmento de reta representa o valor eficaz de CA_1.
- Outro segmento de reta representa o valor eficaz de CA_2.
- O ângulo entre os dois fasores representa o ângulo de defasagem, que neste caso é de 0º.

A **Fig.30** mostra o gráfico senoidal e vetorial de duas CA em fase.

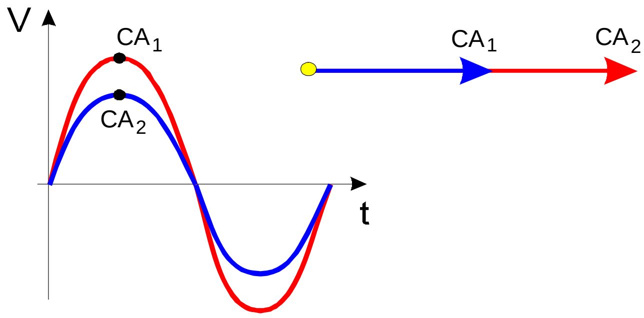


Fig.30 Gráfico senoidal e fasorial de duas tensões alternadas em fase.

REPRESENTAÇÃO FASORIAL DE GRANDEZAS SENOIDAIS DEFASADAS

Para representar grandezas senoidais defasadas, os princípios são os mesmos:

- Um segmento de reta para cada grandeza.
- Um ângulo entre os fasores que expressa a defasagem.

Há porém alguns cuidados a serem observados. Sempre que se observa um gráfico de grandezas senoidais defasadas toma-se uma das grandezas como referência para depois verificar se as outras estão adiantadas ou atrasadas em relação a estas.

Para os gráficos fasoriais obedece-se o mesmo princípio. Em geral, costuma-se traçar um sistema de eixos ortogonais que servirá de base para o gráfico e traçar o fasor de referência no sentido horizontal para a direita, como mostrado na **Fig.31**.

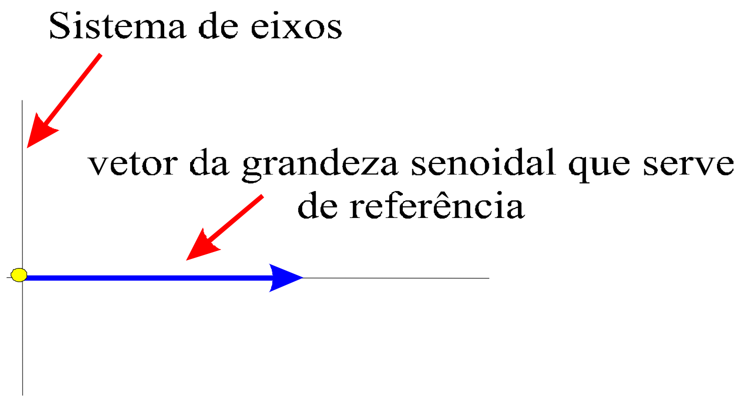


Fig.31 Traçado do fasor de referência.

Veja, por exemplo, o gráfico senoidal apresentado na **Fig.32** com a CA_1 tomada como referência.

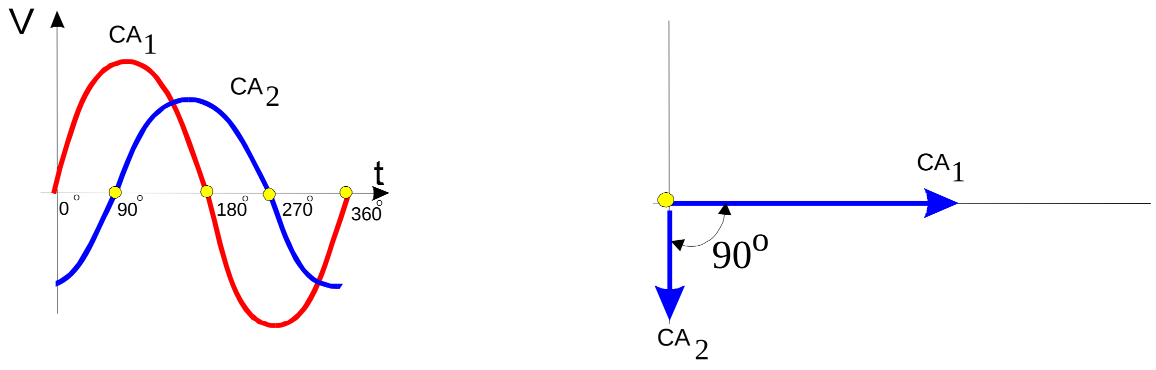


Fig.32 Tensões senoidais CA_1 (referência) e CA_2.

A partir do fasor de referência, posiciona-se os demais fasores. Fasores colocados no sentido horário estão atrasados com relação a referência e vice versa, como mostrado na **Fig.33**.

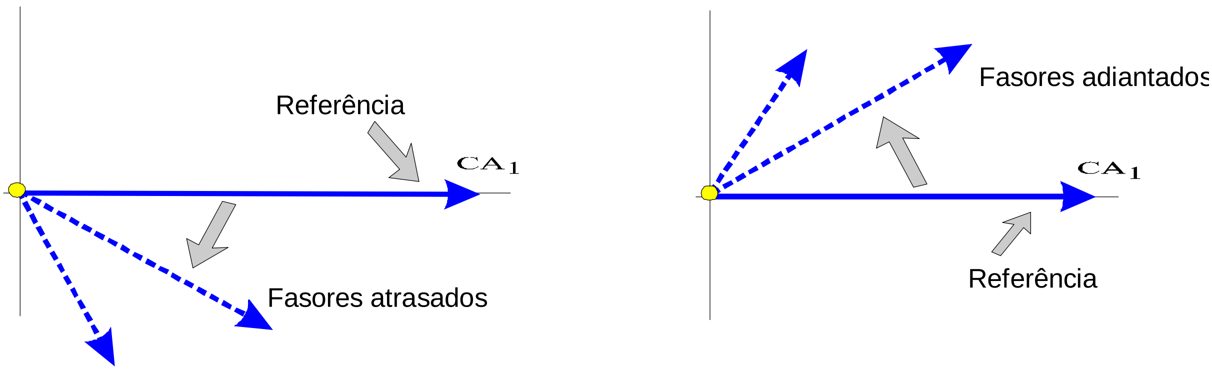


Fig.33 Fasores atrasados e adiantados.

No gráfico senoidal usado como exemplo, a CA_2 está atrasada 90° com relação a CA_1, de forma que o gráfico se apresenta conforme a **Fig.34**.

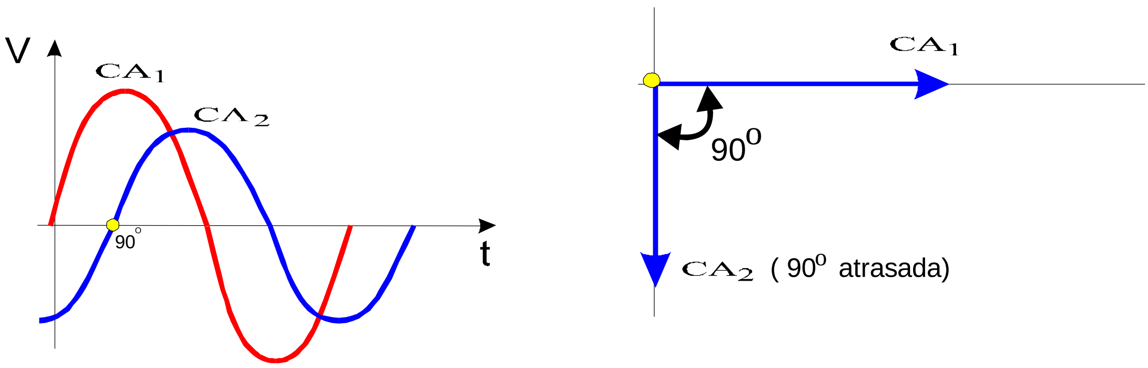
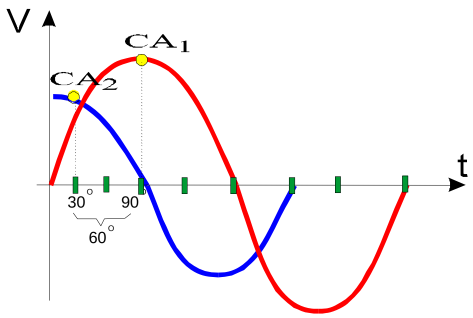
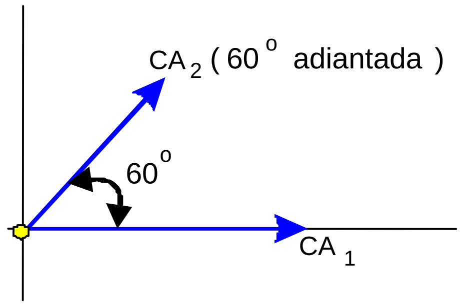
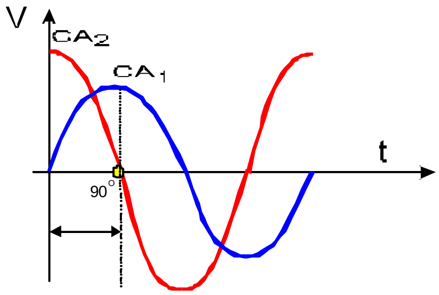


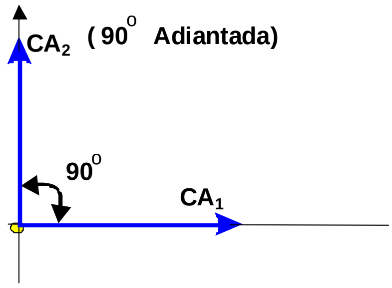
Fig.34 Vetor atrasado 90° .

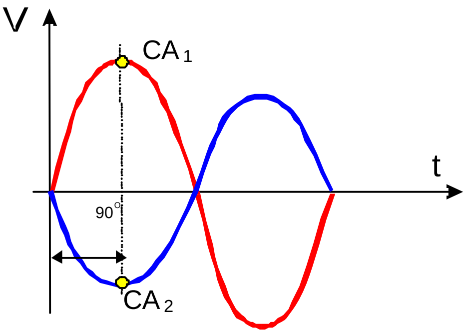
A seguir estão colocados alguns exemplos de gráficos senoidais e seus respectivos gráficos vetoriais. Os valores apresentados nos gráficos senoidais são valores eficazes.

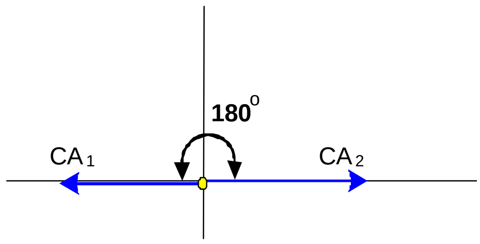

V
CA1
CA2
t
30°
90
60°


CA 2 (60 o adiantada)
60 o
CA 1


V
CA2
CA1
t
90°


CA2 (90o Adiantada)
90o
CA1


V
CA 1
t
90°
CA 2


180o
CA 1
CA 2

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Quando se pode afirmar que duas tensões alternadas estão em fase ?

2. Esboce um diagrama fasorial de duas tensões alternadas defasadas.

BIBLIOGRAFIA

DAWES, CHESTER L. **Curso de Eletrônica**; corrente alternada. (A course in electrical engeneering) Trad. de João Protássio Pereira da Costa. 18.ª ed., Porto Alegre, Globo, 1979, vol.4

SOUZA, HIRAN R. DE. **Estática**. São Paulo, PRO-TEC, 1977.

TEIXEIRA JÚNIOR, ANTÔNIO DE SOUZA. **Física**, Curso Colegial. 13.ª ed., São Paulo, Brasil, 1965, vol.1 (Coleção Didática do Brasil - Série Colegial, vol.6).

VAN VALKENBURG, NOOGER & NEVILLE. **Eletricidade Básica**. 5.ª ed., Rio de Janeiro, Freitas Bastos, 1964, vol.4 il.

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

A busca constantes da qualidade e a preocupação com o atendimento ao cliente estão presentes nas ações do *SENAI*.

Introdução

Cada componente eletrônico tem características próprias que influenciam em seu comportamento o desempenho de circuitos.

Por esse motivo, resistores e capacitores reagem de forma diferente quando ligados em CC ou CA, ocasionando reações diversas nos circuitos.

Este fascículo tratará do comportamento dos resistores e capacitores em CA e da forma de como utilizar um osciloscópio para observar esses efeitos.

Compreender o comportamento de componentes isolados tanto em CA como em CC é condição indispensável para que se compreenda o funcionamento desses componentes em um circuito eletrônico.

Para ter sucesso no desenvolvimento do conteúdo e atividades deste fascículo, o leitor já deverá ter conhecimentos relativos a:

- Corrente alternada.
- Capacitores.
- Representação fasorial de parâmetros elétricos.

Relação de fase entre tensão e corrente nos resistores e capacitores

Quando se conecta uma carga puramente resistiva (resistor, lâmpada, aquecedor) a uma rede de corrente alternada senoidal, a corrente circulante no circuito também tem a forma senoidal, como mostrado na **Fig.1**.

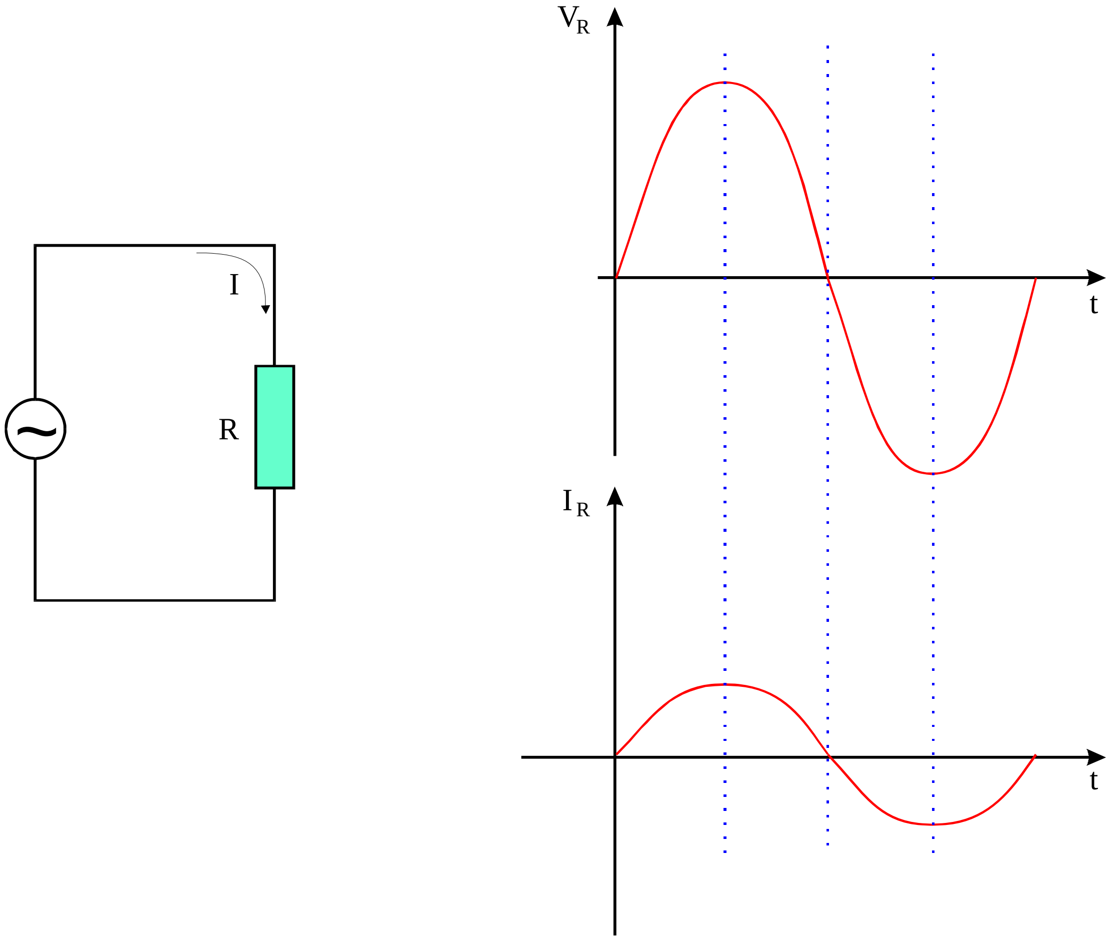


Fig.1 Tensão senoidal aplicada a uma carga resistiva.

A corrente no resistor obedece à Lei de Ohm. Como o valor de R é fixo, a corrente é proporcional à tensão.

Quando a tensão no resistor tem valor “0”, a corrente também tem valor “0”. Quando a tensão no resistor atinge o máximo positivo ($+V_p$), a corrente também atinge o máximo positivo ($+I_p$) e assim por diante. A **Fig.2** ilustra esse comportamento.

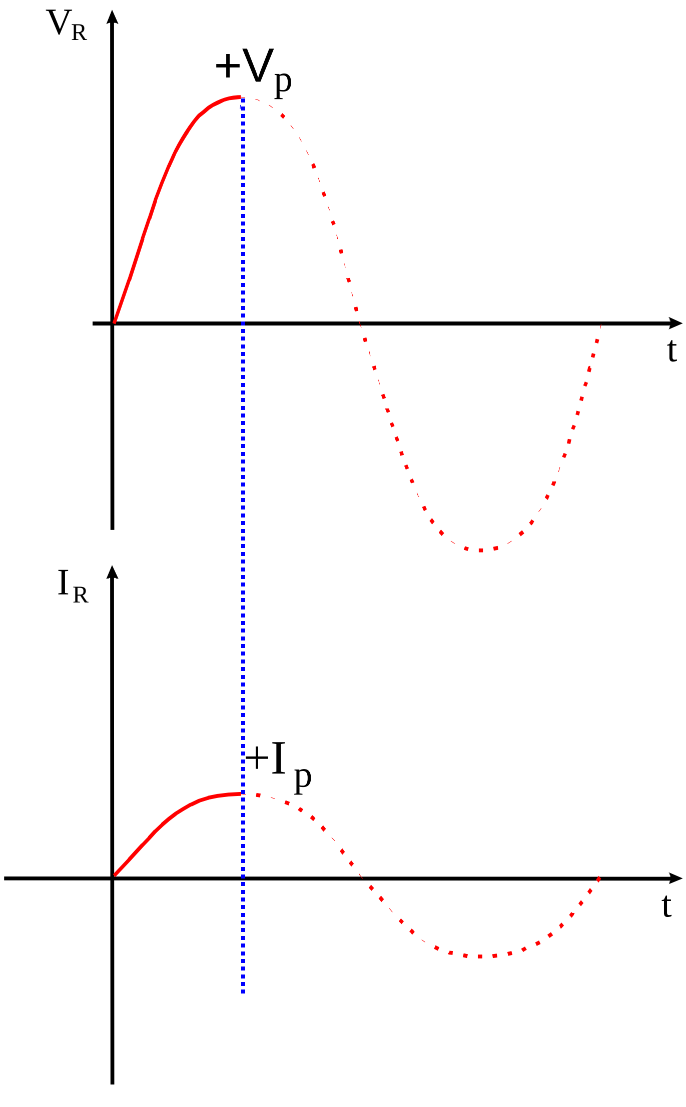


Fig.2 Comportamento da tensão e corrente num resistor submetido a uma tensão senoidal.

Isso pode ser observado claramente sobrepondo os gráficos de tensão e corrente do resistor nos mesmos eixos.

A **Fig.3** mostra o gráfico senoidal da tensão e corrente em um resistor ao qual foi aplicada uma fonte de CA.

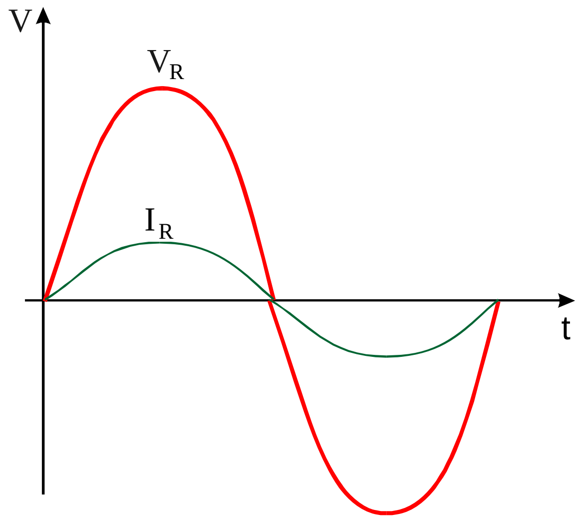


Fig.3 Sobreposição de tensão e corrente num resistor submetido a uma tensão.

Observa-se através da sobreposição dos gráficos senoidais que tensão e corrente têm a mesma forma senoidal, a mesma freqüência e passam pelo zero, no mesmo sentido e ao mesmo tempo.

Quando isto acontece, diz-se que a tensão e a corrente estão em fase ou que a defasagem entre tensão e corrente é zero.

Nas cargas puramente resistivas em CA, a corrente e a tensão estão em fase.

O comportamento da tensão e corrente em um circuito puramente resistivo pode ser expresso através de um gráfico fasorial. Um fasor representa a tensão na carga e outro a corrente.

Como tensão e corrente estão em fase os dois fasores são sobrepostos, como mostrado na **Fig.4**.

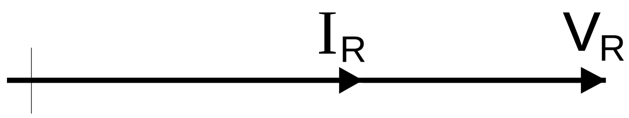


Fig.4 Diagrama fasorial de tensão e corrente.

O comprimento de cada segmento de reta (módulo) representa o valor da grandeza expressa fasorialmente, conforme representado na **Fig.5**.

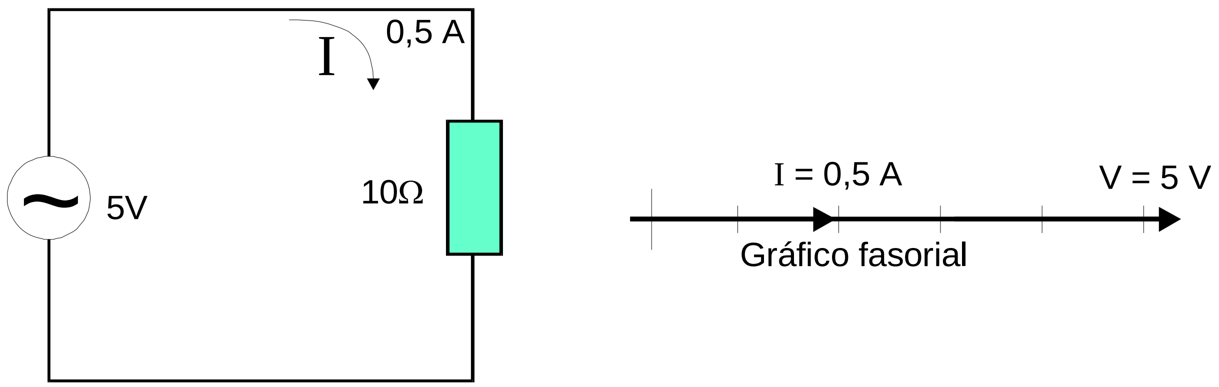


Fig.5 Módulo dos fasores tensão e corrente.

Como exemplos de cargas resistivas, onde tensão e corrente estão em fase, tem-se: resistores, lâmpadas, resistências de ferro de passar, resistência de ferro de soldar, resistência de aquecedores etc.

RELAÇÕES DE FASE ENTRE TENSÃO E CORRENTE NOS CAPACITORES

Quando se conecta um capacitor a uma fonte geradora, as armaduras estão completamente descarregadas.

Inicia-se o processo de carga do capacitor. Como não existe tensão sobre o capacitor ($V_C = 0$), a corrente de carga (I_C) é máxima, como ilustrado na **Fig.6.**

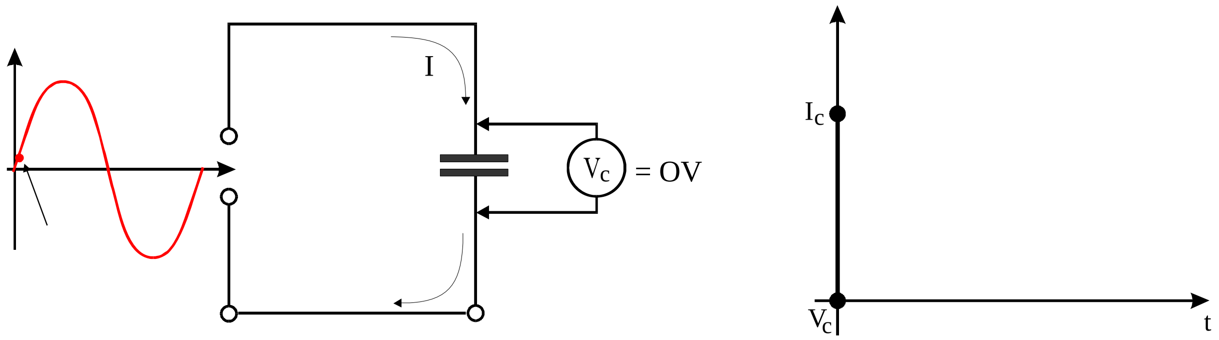


Fig.6 Processo de carga de um capacitor.

À medida que a tensão sobre o capacitor aumenta, a corrente de carga diminui porque as cargas já armazenadas no capacitor se opõem à entrada de novas cargas, como ilustrado na **Fig.7**.

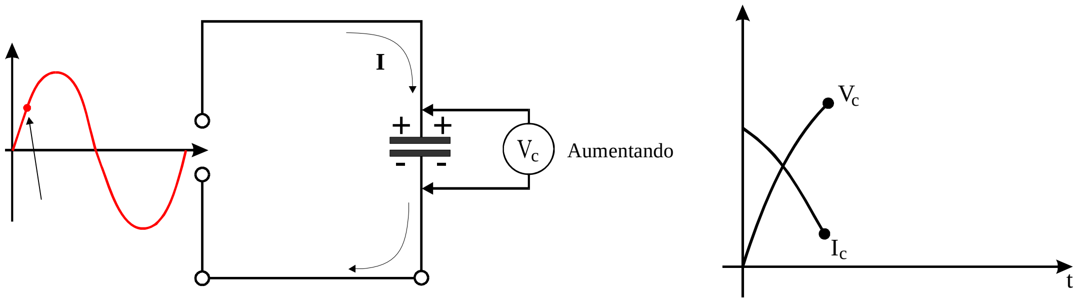


Fig.7 Pontos intermédiarios da curva de carga de um capacitor.

A corrente continua diminuindo até atingir o valor zero, no momento em que a tensão no capacitor se iguala à tensão da fonte, como mostrado na **Fig. 8**.

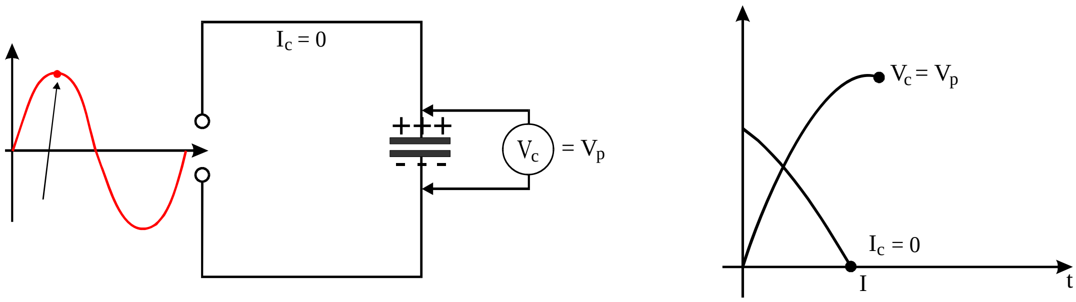


Fig.8 Ponto da curva de carga do capacitor onde $V_c = V_p$

Observa-se pelo gráfico senoidal, que a corrente do capacitor atinge o valor máximo 90º antes que a tensão atinja o seu valor máximo. Este adiantamento da corrente em relação à tensão no capacitor ocorre durante todo ciclo da CA, como mostrado na **Fig.9**.

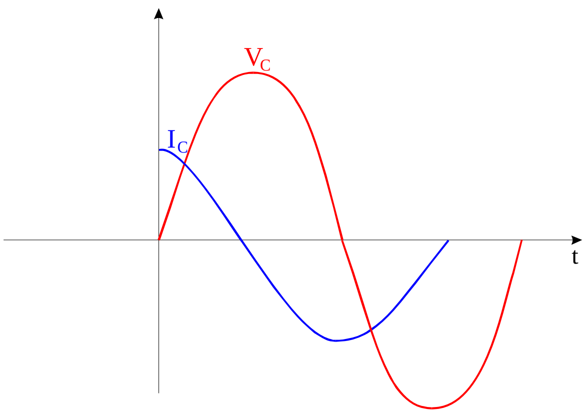


Fig.9 Relação entre corrente e tensão.

Nos capacitores, a corrente está adiantada 90º (meio semiciclo) em relação à tensão.

A defasagem pode ser representada através de um gráfico fasorial. Um fasor representa a tensão sobre o capacitor e o outro, a corrente.

Como corrente e tensão no capacitor estão defasados de 90º, os seus fasores são representados de tal forma que haja um ângulo de 90º entre eles.

A **Fig.10** mostra a representação fasorial da defasagem entre tensão e corrente no capacitor.



Fig.10 Representação fasorial da defasagem entre tensão e corrente no capacitor.

Medição do ângulo de fase com o osciloscópio de duplo traço

Em muitas ocasiões, torna-se necessário analisar ou determinar a relação de fase entre duas tensões CA ou entre uma tensão e uma corrente CA em um componente. Isso pode ser feito através de um osciloscópio de duplo traço.

Esse processo somente pode ser utilizado para CA de freqüências iguais porque quando as freqüências são diferentes, o ângulo de fase está em constante modificação, como mostrado na **Fig.11**.

Pode-se, assim, verificar que sinais de mesma frequência (mesmo período T) levam a uma defasagem constante de 90º; sinais de freqüências diferentes, a uma defasagem variável.

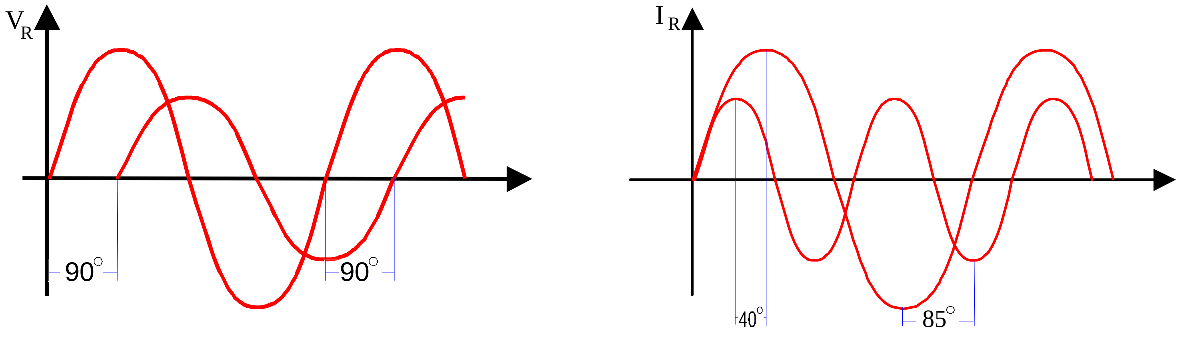


Fig.11 Defasagem constante e defasagem variável.

Para verificar a relação de fase entre uma tensão e uma corrente CA em um componente ou circuito, é necessário observarem-se simultaneamente duas senóides:

- A senóide da tensão.
- A senóide da corrente.

Para observar a senóide da tensão, emprega-se um dos canais do osciloscópio, conectando a ponta de prova (sinal terra) diretamente nos pontos onde se queira observar.

A **Fig.12** mostra as pontas de prova conectadas a um circuito e a projeção na tela que corresponde à senóide da tensão aplicada.

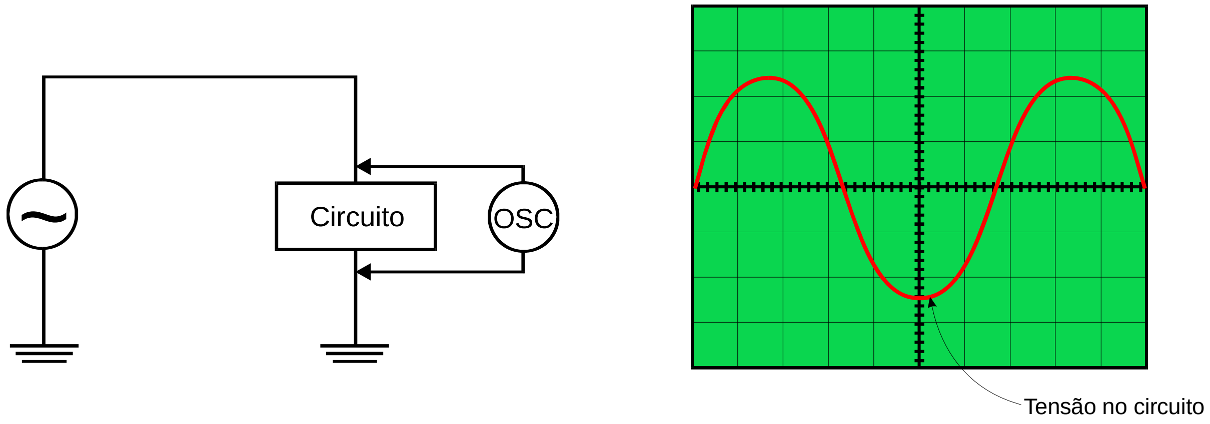


Fig.12 Visualização da tensão senoidal aplicada.

Para se observarem as variações de corrente no osciloscópio, é necessário que essas variações de corrente sejam transformadas em variações de tensão que possam ser vistas no osciloscópio.

Para se observarem formas de onda de corrente com o osciloscópio, as variações de corrente devem ser transformadas em variações de tensão.

O resistor é o componente ideal para realizar a conversão de corrente em tensão por duas razões:

- A tensão presente entre os sinais de um resistor é proporcional à corrente.
- A tensão desenvolvida no resistor está em fase com a corrente.

Assim, toda a vez que for necessário observar com osciloscópio a forma de onda de corrente em um circuito, deve-se incluir um resistor em série com este circuito.

A queda de tensão nesse resistor será proporcional e estará em fase com a corrente do circuito, como mostrado na **Fig.13**.

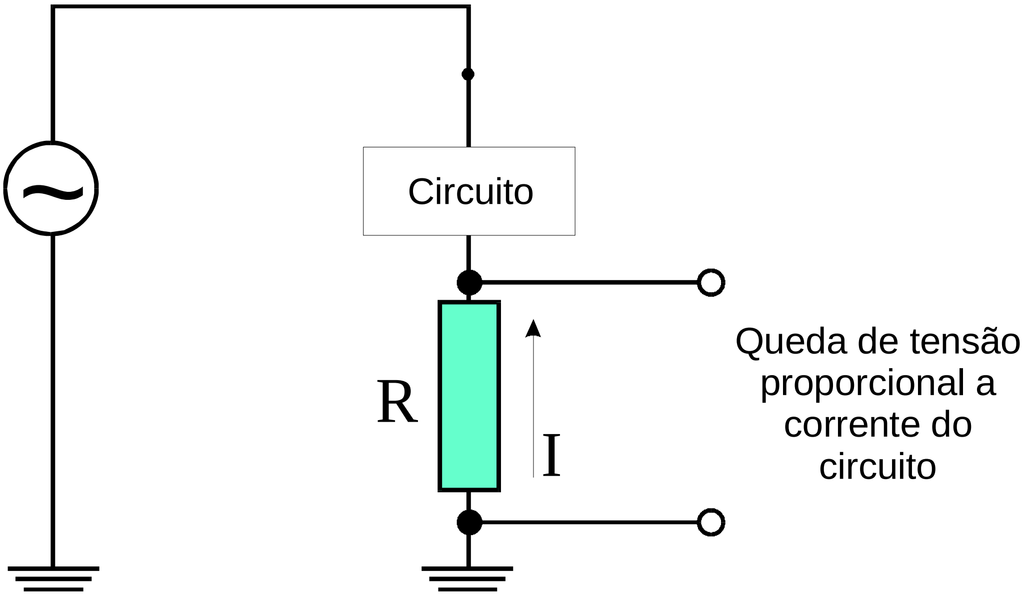


Fig.13 Queda de tensão proporcional e em fase com a corrente.

Conectando as pontas de prova do osciloscópio nos terminais desse resistor, a forma de onda apresentada na tela representará a corrente no circuito, como ilustrado na **Fig.14**.

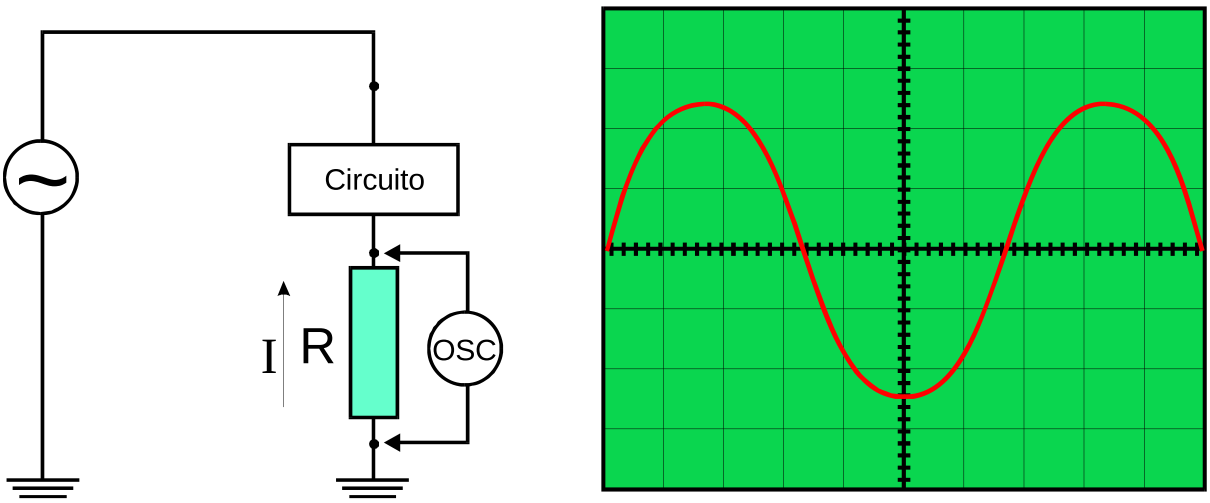


Fig.14 Obsevando a corrente através da tensão no osciloscópio.

É importante lembrar que, ao inserir um resistor em série com um circuito, este resistor interfere na resistência total, provocando uma alteração na corrente circulante como pode ser visto na **Fig.15**.

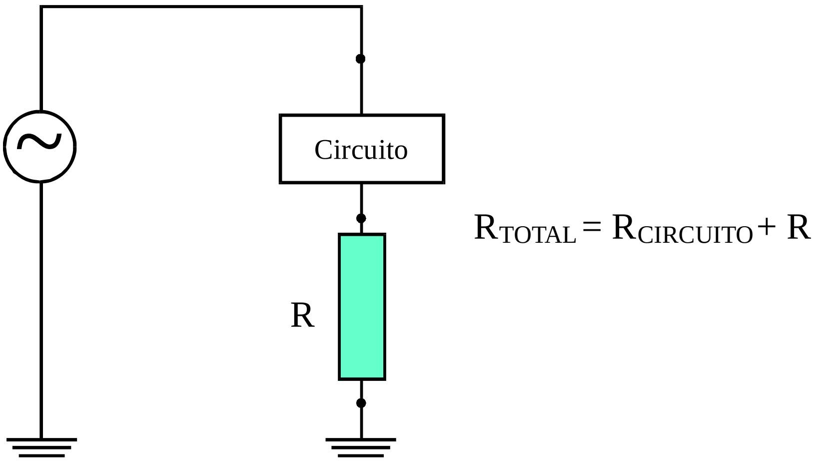


Fig.15 A inclusão de R muda a corrente do circuito.

Para se evitar que o resistor acrescentado influencie significativamente nos resultados observados, deve-se utilizar um valor para esse resistor que seja pequeno com relação à resistência do circuito que se deseja analisar.

O resistor acrescentado para converter corrente em tensão deve ter resistência pequena, comparada com a resistência do circuito analisado.

Em geral, utiliza-se um resistor cujo valor máximo não ultrapasse 10% da resistência do circuito que se deseja analisar, como ilustrado na **Fig.16**.

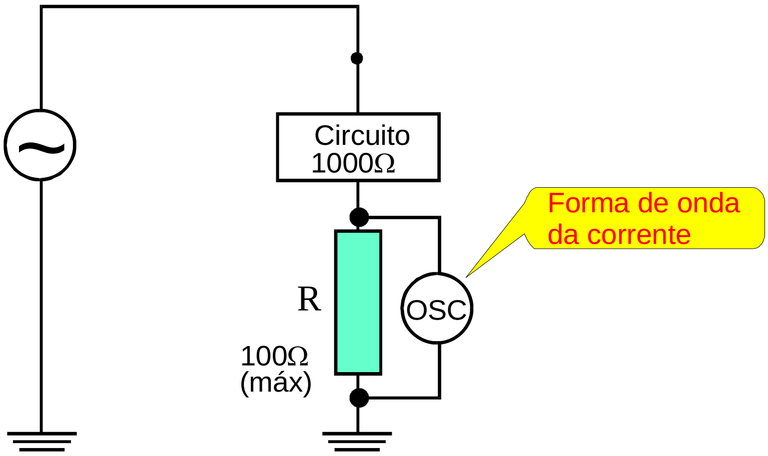


Fig.16 Circuito com resistor pequeno para medir I.

Como normalmente se necessitam observar simultaneamente as formas de onda de tensão e de corrente, utiliza-se um osciloscópio de duplo traço da seguinte forma:

- Um dos canais é colocado sobre o resistor. Este canal mostra a forma de onda de corrente.
- Outro canal é aplicado diretamente sobre a carga.

A **Fig.17** mostra como seria conectado o osciloscópio de duplo traço para verificar a relação de fase entre corrente e tensão em um resistor.

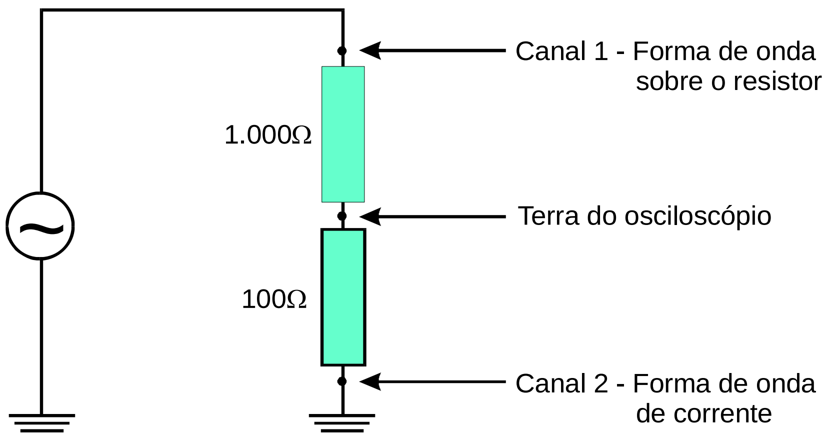


Fig.17 Ligação do osciloscópio de duplo traço.

O fato de se conectar o terra do osciloscópio no meio dos dois componentes a serem medidos implica no fato de que o canal 1 (**Fig.17**) apresenta uma medição acima da referência e o canal 2 uma medição abaixo da referência.

Sempre que o osciloscópio for conectado dessa forma, deve-se usar a entrada com inversão do osciloscópio para a medição abaixo da referência, como mostrado na **Fig.18**.

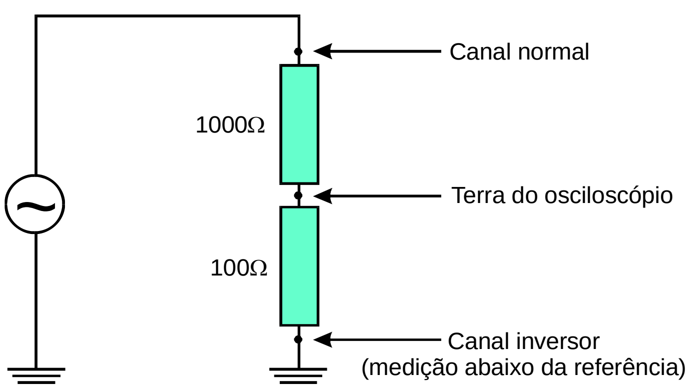


Fig.18 Ligação do canal inversor.

A **Fig.19** mostra como as senóides de corrente e tensão sobre o resistor aparecerão na tela.

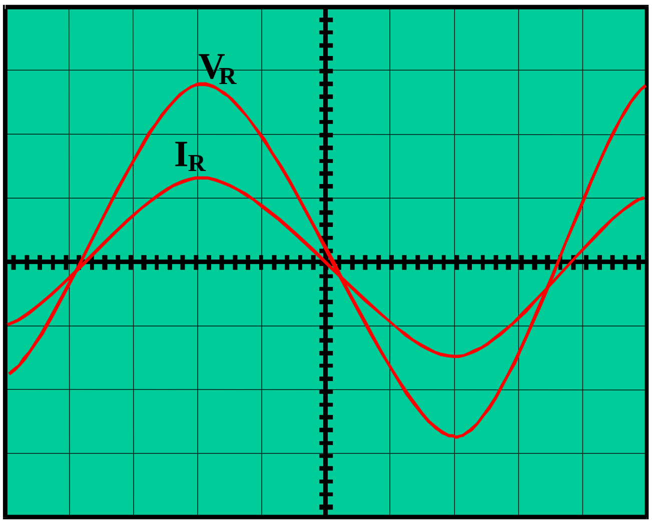


Fig.19 Visualização das senóides de corrente e tensão.

O mesmo processo pode ser usado para se determinar a relação de fase entre tensão e corrente em componentes como o capacitor na forma ilustrada na **Fig.20**.

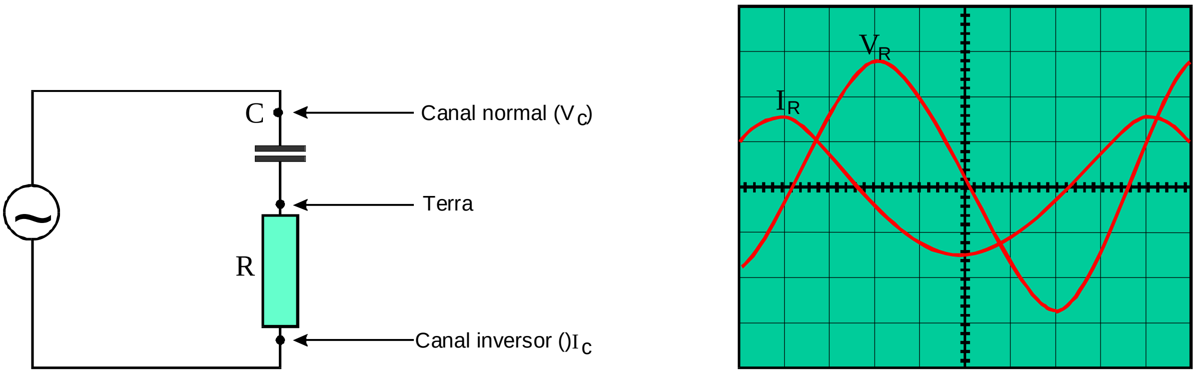


Fig.20 Relação de fase entre tensão e corrente em um capacitor.

O valor do resistor deve ser no máximo de 10% do valor da reatância capacitiva do capacitor.

As divisões horizontais da tela podem ser usadas para se determinar o ângulo de defasagem.

Medição de ângulo de fase por figuras de Lissajous

Figuras de Lissajous é o nome dado as figuras que aparecem na tela do osciloscópio quando se aplicam sinais às entradas vertical e horizontal do osciloscópio, desligando a varredura horizontal interna.

A **Fig.21** mostra algumas figuras de Lissajous.

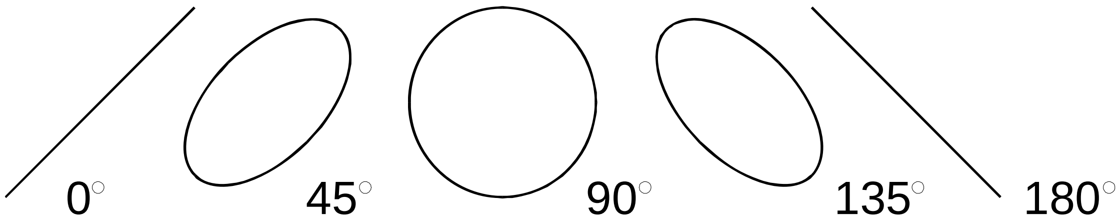


Fig.21 Exemplos de figuras de Lissajous.

Através das figuras de Lissajous é possível determinar a relação de fase entre duas CA de mesma freqüência usando um osciloscópio de traço simples.

CONEXÃO DO OSCILOSCÓPIO AO CIRCUITO

Para se determinar o ângulo de fase, os dois sinais (de mesma freqüência) são aplicados às entradas vertical e horizontal, mantendo-se a chave de varredura horizontal na posição "externa".

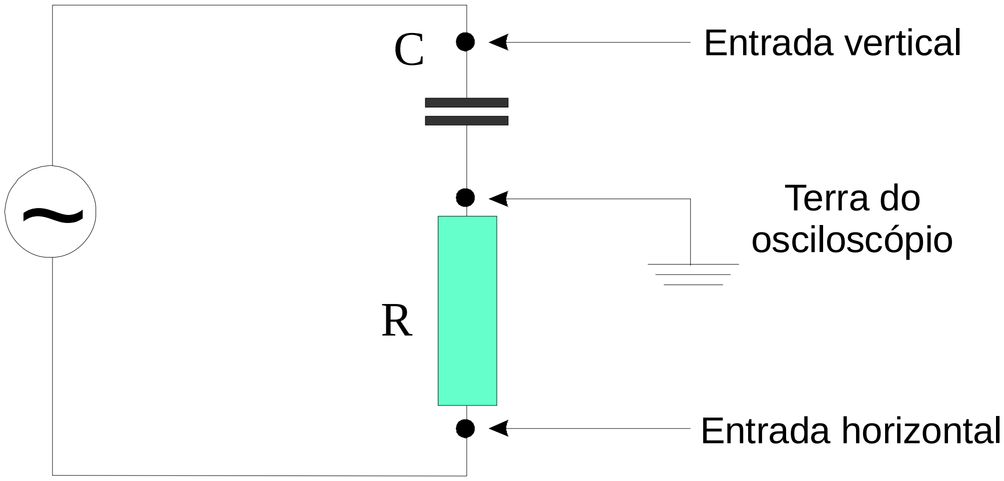


Fig.22 Determinação do ângulo de fase.

O resistor R no circuito da **Fig.22** converte as variações de corrente em variações de tensão.

Após a colocação dos dois sinais, há a formação de uma figura de Lissajous na tela, como pode ser visto na **Fig.23**.

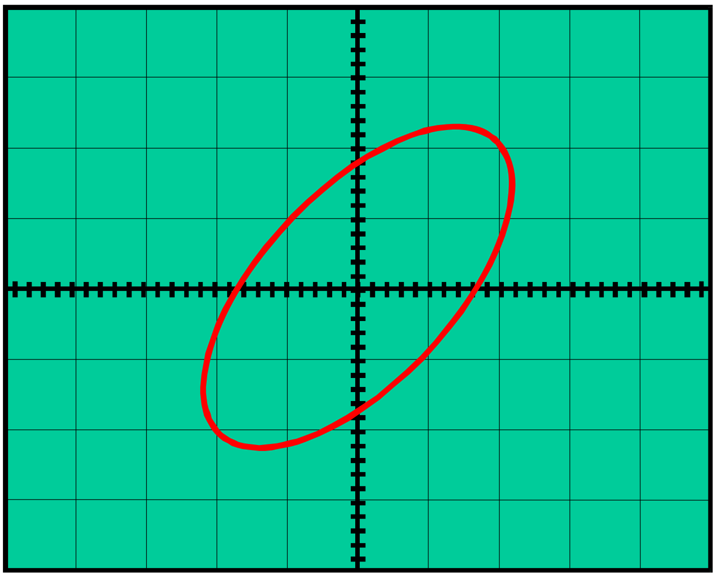


Fig.23 Figura de Lissajous.

Para se obter a leitura correta do ângulo de fase, o sinal aplicado no vertical deve ocasionar a **mesma amplitude de deflexão** na tela que o horizontal (em número de quadros) e a figura deve estar centrada na tela.

Em geral, torna-se necessário atuar no controle da amplitude vertical ou horizontal para analisar o ajuste.

Uma vez centrada a figura, determinam-se dois valores: $Y_{máximo}$ e Y_0 (intersecção da figura com eixo Y), como ilustrado na **Fig.24**.

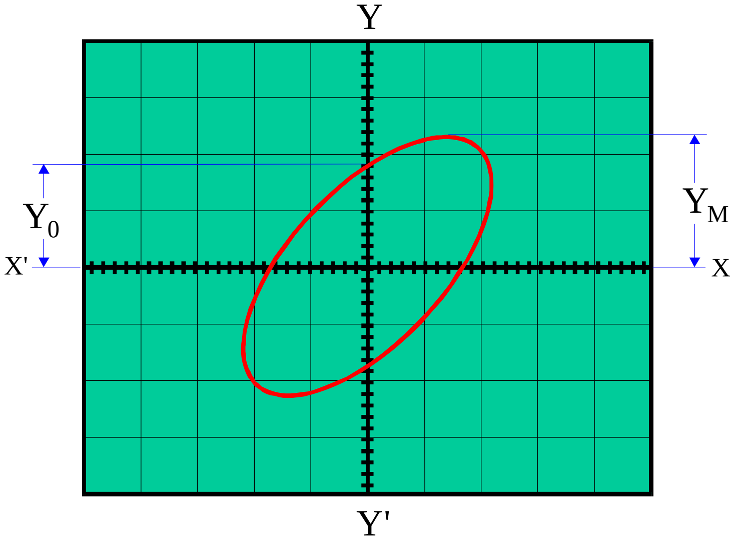


Fig.24 Determinação de $Y_{máximo}$ e $Y_{0.}$

De posse dos dois valores, determina-se o ângulo de fase a partir da equação:

$$\theta = \text{arcsen}\frac{Y_0}{Y_m} \qquad (1)$$

onde :

θ é o ângulo de defasagem

Y_0 e Y_m são leituras da tela

arcsen = função arco cujo seno é…

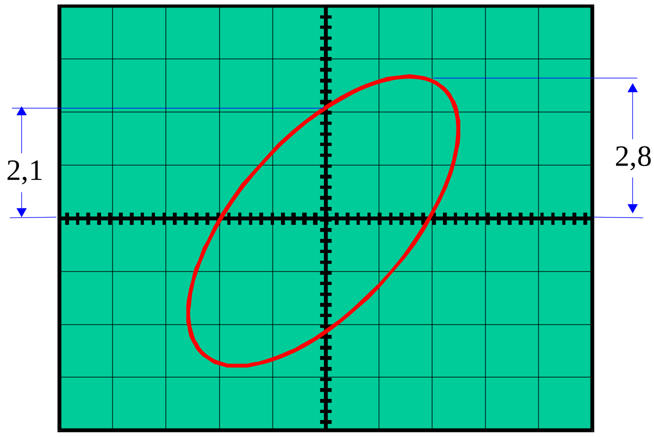
Através das figuras de Lissajous não é possível determinar qual é o sinal adiantado ou atrasado por que isto depende da ordem de ligação dos sinais no osciloscópio.

A seguir é mostrada uma tabela com alguns valores de seno, e um exemplo de determinação do ângulo de fase por figura de Lissajous.

Ângulo	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
Seno	0	0,17	0,34	0,5	0,64	0,71	0,77	0,87	0,94	1

Exemplos 1:

Determinar o ângulo de fase pelo método das figuras de Lissajous

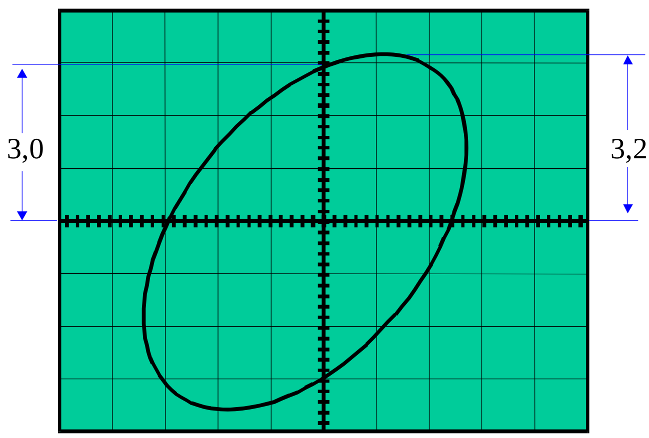


Solução :

$$\theta = \text{arcsen}\,\frac{Y_0}{Y_m} = \frac{2,1}{2,8}$$

$$\theta = \text{arcsen}\,(0,75)$$

$$\theta = 50°.$$



Solução :

$$\theta = \text{arcsen}\,\frac{Y_0}{Y_m} = \frac{3,0}{3,2}$$

$$\theta = \text{arcsen}\,(0,94)$$

$$\theta = 70°.$$

Quando se obtém um círculo perfeito, a defasagem é de 90º, uma vez que $Y_0 = Y_m$.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Qual o comportamento da tensão e da corrente quanto a fase nas cargas puramente resistivas ? E nas cargas capacitivas ?

2. Como se pode observar a forma de onda da corrente com o osciloscópio ?

3. O que são figuras de Lissajous ?

BIBLIOGRAFIA

SENAI/DN. **Impedância**. Rio de Janeiro, Divisão de Ensino e Treinamento, 1980, 91p. (Módulo Instrucional - Eletricidade; Eletrotécnica, 14)

VAN VALKENBURG, NOOGER & NEVILLE. **Eletricidade Básica**. 5.ª ed., Rio de Janeiro, Freitas Bastos, c 1970, vol.3

ZBAR, PAUL B. **Instrumentos e medidas em eletrônica**; Práticas de Laboratório. Trad. Aracy Mendes da Costa. São Paulo, McGraw Hill, 1978, 229p.

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

A busca constantes da qualidade e a preocupação com o atendimento ao cliente estão presentes nas ações do *SENAI*.

Introdução

O magnetismo impressionou o homem desde a antigüidade, quando foi percebido pela primeira vez.

Instigava a curiosidade dos homens saber por que a **magnetita** atraía certos materiais.

Muitos cientistas e curiosos dedicaram anos de suas vidas ao estudo do magnetismo até que o fenômeno fosse completamente conhecido e pudesse ser aplicado proveitosamente.

Este fascículo, que tratará do magnetismo natural e do produzido por corrente elétrica, visa a levar ao leitor o conhecimento da origem e das características do magnetismo e dos ímãs.

Magnetismo

O magnetismo é uma propriedade que certos materiais possuem que faz com que esses materiais exerçam uma atração sobre materiais ferrosos.

As propriedades dos corpos magnéticos são grandemente utilizadas em eletricidade (motores, geradores etc.) e eletrônica (instrumentos de medição, transmissão de sinais etc.).

MAGNETISMO NATURAL - ÍMÃS

Alguns materiais encontrados na natureza apresentam propriedades magnéticas naturais. Esses materiais são denominados de ímãs naturais.

Ímãs naturais são materiais que apresentam propriedades magnéticas naturais.

A magnetita é um minério de ferro que é naturalmente magnético, ou seja, é um ímã natural.

ÍMÃS ARTIFICIAIS

Os ímãs artificiais são barras de materiais ferrosos que o homem magnetiza por processos artificiais.

Os ímãs artificiais são muito empregados porque podem ser fabricados com os mais diversos formatos, de forma a atender as necessidades práticas. A **Fig.1** mostra alguns exemplos.

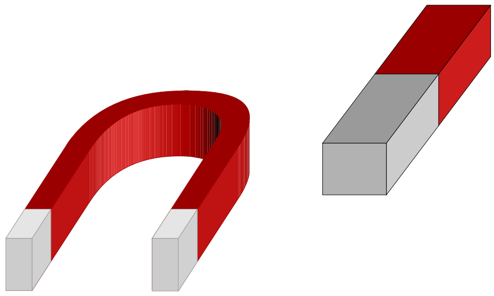


Fig.1 Exemplos de formas de ímãs artificiais.

Os ímãs artificiais em geral têm propriedades magnéticas mais intensas que os naturais.

PÓLOS MAGNÉTICOS DE UM ÍMÃ

Externamente, as forças de atração magnéticas de um ímã se manifestam com maior intensidade nas suas extremidades.

Por essa razão as extremidades são denominadas de **pólos magnéticos do ímã,** como ilustrado na **Fig.2**.

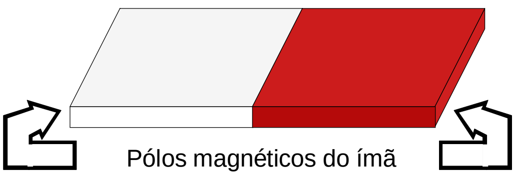


Fig.2 Pólos magnéticos de um ímã.

Os pólos magnéticos são as regiões extremas do ímã onde as forças de atração magnéticas se manifestam com maior intensidade.

Cada um dos pólos apresenta propriedades magnéticas específicas, sendo denominados de **pólo sul e pólo norte**.

Os pólos do ímã são denominados de pólo norte e pólo sul.

Uma vez que as forças de atração magnéticas dos ímãs são mais concentradas nos pólos, conclui-se que a intensidade dessas propriedades decresce para o centro do ímã.

Na região central do ímã, estabelece-se uma linha onde as forças de atração magnéticas do pólo sul e do pólo norte são iguais e se anulam.

Esta linha é denominada **neutra**. A linha neutra é, portanto, a linha divisória entre os pólos do ímã, como ilustrado na **Fig.3**.

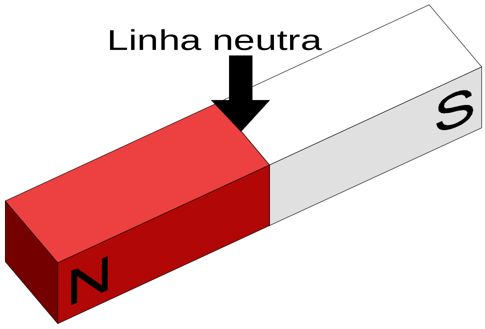


Fig.3 Linha neutra de um ímã.

ORIGEM DO MAGNETISMO

O magnetismo tem sua origem na organização atômica dos materiais. Cada molécula de um material é um pequeno ímã natural, denominado de ímã molecular ou domínio, como mostrado na **Fig.4**.

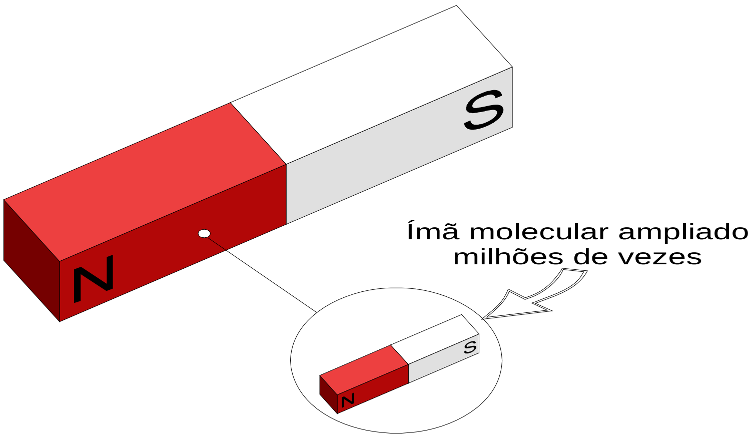


Fig.4 Ímã molecular.

Quando durante a formação de um material, as moléculas se orientam em sentidos diversos e com isso os efeitos magnéticos dos ímãs moleculares se anulam no todo do material, resulta em um material sem magnetismo natural, como ilustrado na **Fig.5**.

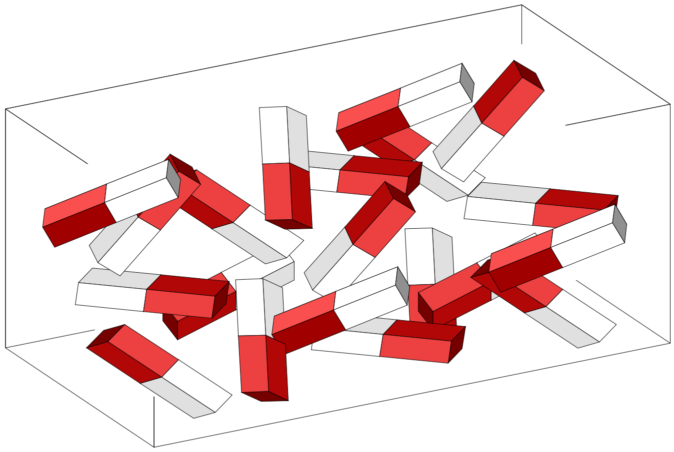


Fig.5 Material sem magnetismo natural.

Se, durante a formação do material, as moléculas assumirem uma orientação única (ou predominante), os efeitos magnéticos de cada ímã molecular se somam dando origem a um ímã com propriedades magnéticas naturais, como mostrado na **Fig.6**.

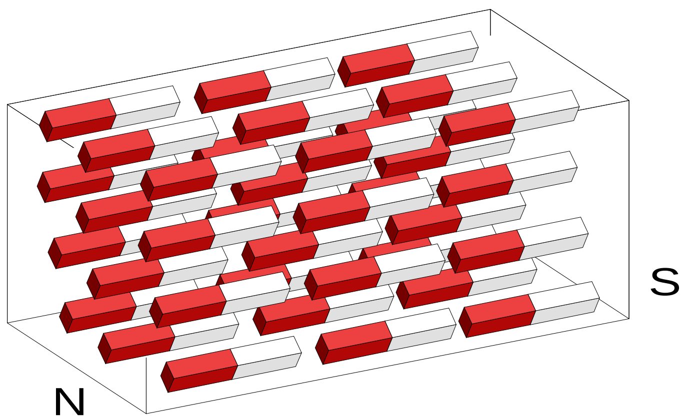


Fig.6 Material com magnetismo natural.

Na fabricação de ímãs artificiais, as moléculas de um material (desordenado) sofrem um processo de orientação a partir de forças externas.

INSEPARABILIDADE DOS PÓLOS

Os ímãs têm uma propriedade característica: por mais que se divida um ímã em partes menores, as partes sempre terão um pólo norte e um pólo sul, como pode ser visto na **Fig.7**.

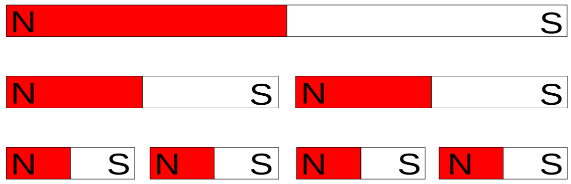


Fig.7 Inseparabilidade dos pólos.

Esta propriedade é denominada de **inseparabilidade dos pólos.**

Inseparabilidade dos pólos é a propriedade do ímã de ser dividido em partes até a condição de ímã molecular, tornando-se impossível isolar um pólo norte ou pólo sul.

INTERAÇÃO ENTRE ÍMÃS

Quando os pólos magnéticos de dois ímãs estão próximos, as forças magnéticas dos ímãs reagem entre si de forma singular.

Se os dois pólos magnéticos próximos forem diferentes (norte de um com o sul do outro) há uma atração entre os dois ímãs. Se os dois pólos próximos forem iguais (norte de um próximo ao norte do outro) há uma repulsão entre os dois ímãs. Esses efeitos podem ser vistos na **Fig.8**.

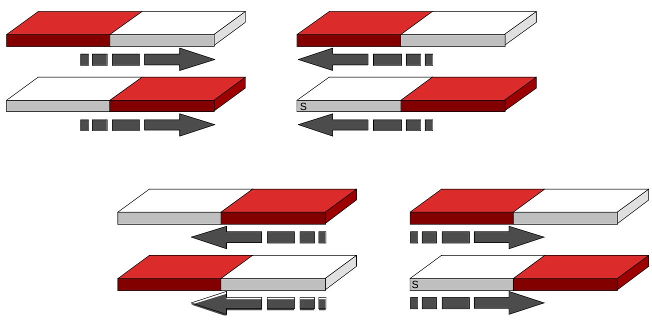


Fig.8 Interação entre os ímãs.

Pólos magnéticos iguais se repelem. Pólos magnéticos diferentes se atraem.

CAMPO MAGNÉTICO - LINHA DE FORÇA

Os efeitos de atração ou repulsão entre dois ímãs ou de atração de um ímã sobre os materiais ferrosos se devem à existência de um campo magnético que provém do ímã.

O espaço ao redor do ímã em que existe atuação das forças magnéticas é denominado de **campo magnético**.

Como artifício para estudar esse campo magnético, admite-se a existência de **linhas de força** magnéticas ao redor do ímã.

As linhas de força magnéticas de um ímã são invisíveis e somente podem ser constatadas com o auxílio de um **recurso**.

Colocando-se um ímã embaixo de uma lâmina de vidro e espelhando (borrifando) limalha de ferro sobre o vidro, as limalhas se orientam conforme as linhas de força magnéticas, como ilustrado na **Fig.9**.

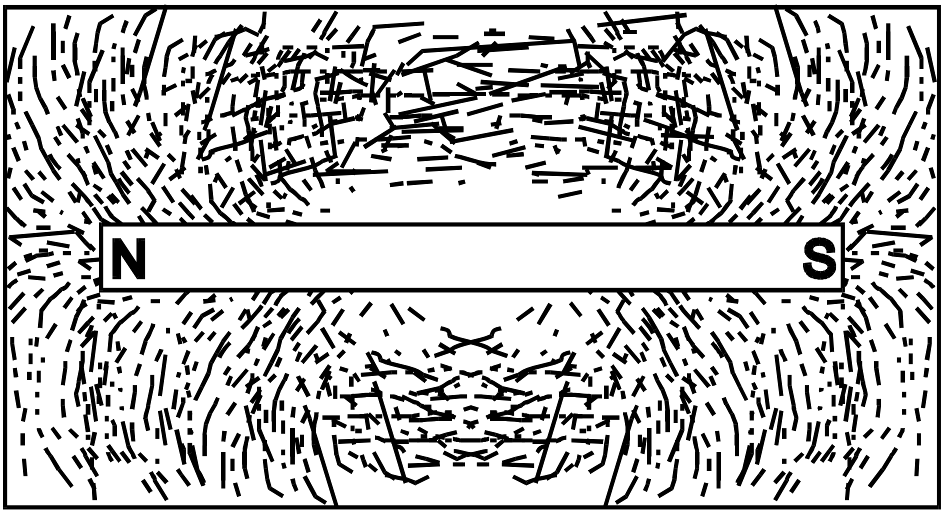


Fig.9 Linhas de força magnéticas.

O formato característico das limalhas sobre o vidro, denominado de espectro magnético, é apresentado na **Fig.10**.

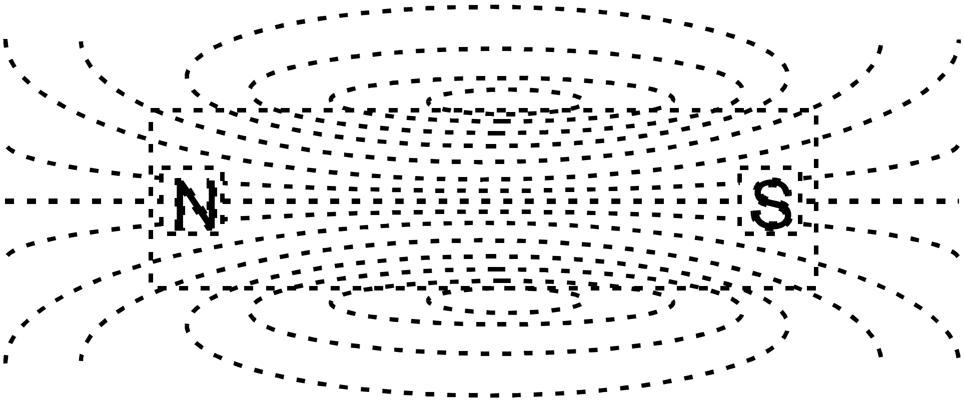


Fig.10 Espectro magnético.

Essa experiência mostra também uma maior concentração de limalhas na região dos pólos do ímã devido à maior intensidade de magnetismo nas regiões polares.

A maior intensidade do magnetismo deve-se ao fato de que a maioria das linhas de forças magnéticas se concentra nas extremidades, passando através da seção transversal nos pólos, como pode ser visto na **Fig.11**.

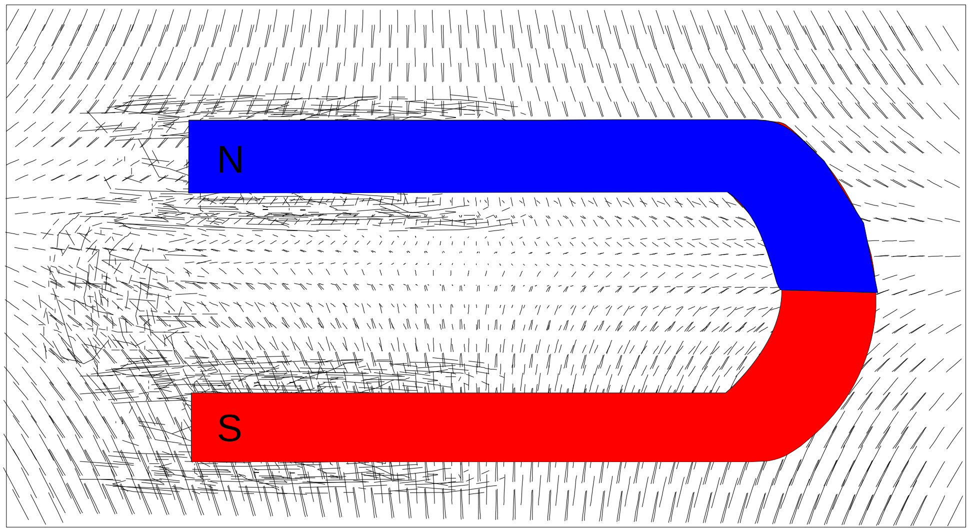


Fig.11 Regiões de maior intensidade magnética.

A maior intensidade do magnetismo nos pólos do ímã se deve a concentração das linhas de força que ocorre nestas regiões.

ORIENTAÇÃO DAS LINHAS DE FORÇA

Com o objetivo de padronizar os estudos relativos ao magnetismo e às linhas de força, estabeleceu-se como convenção que as linhas de força de um campo magnético se dirigem do pólo note para o pólo sul, como ilustrado na **Fig.12**.

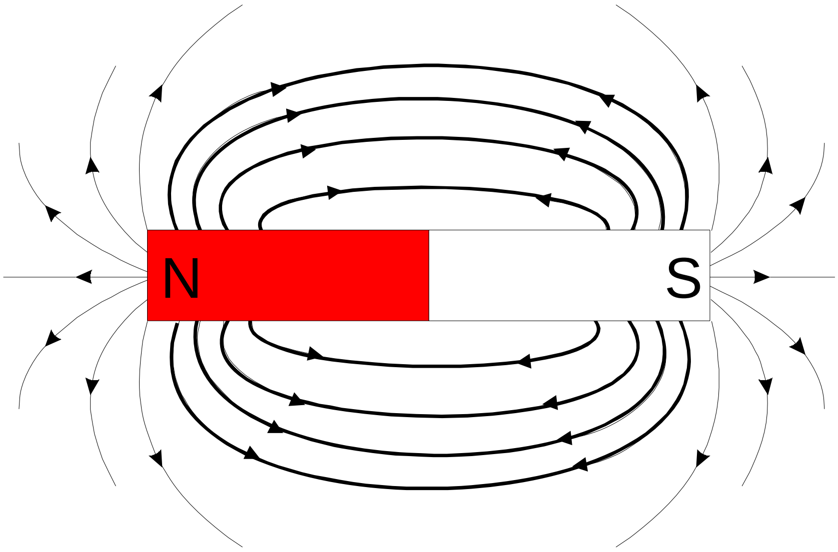


Fig.12 Convenção do sentido das linhas de força.

Sentido das linhas de força por convenção: do pólo norte para o pólo sul.

Esta convenção se aplica às linhas de força externas ao ímã.

ELETROMAGNETISMO

A denominação eletromagnetismo se aplica a todo o **fenômeno magnético que tenha origem em uma corrente elétrica.**

Eletromagnetismo: fenômeno magnético provocado pela circulação de uma corrente elétrica.

CAMPO MAGNÉTICO EM UM CONDUTOR

Quando um condutor é percorrido por uma corrente elétrica, ocorre uma orientação no movimento das partículas no seu interior.

Essa orientação do movimento das partículas tem um efeito semelhante à orientação dos ímãs moleculares.

Como conseqüência dessa orientação, verifica-se o surgimento de um campo magnético ao redor do condutor, como pode ser visto na **Fig.13**.

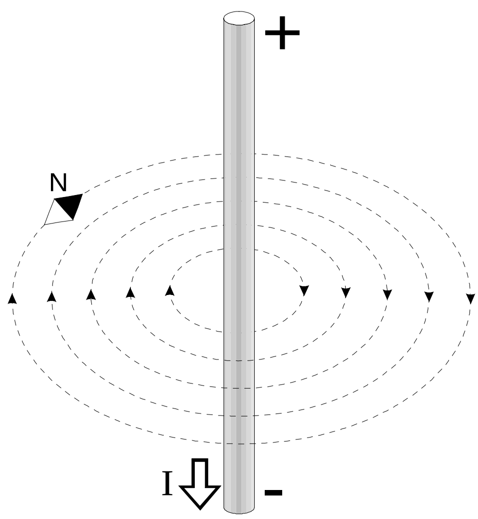


Fig.13 Campo criado pela passagem de uma corrente no condutor.

As linhas de força desse campo magnético, criado pela corrente elétrica que passa por um condutor, são circunferências concêntricas num plano perpendicular ao condutor.

A circulação de corrente em um condutor dá origem a um campo magnético ao seu redor.

O sentido de deslocamento das linhas de força é dado pela **regra de mão direita**, para o **sentido convencional da corrente elétrica.**

REGRA DA MÃO DIREITA

Envolvendo o condutor com os quatro dedos da mão direita de forma que o dedo polegar indique o sentido da corrente (convencional), o sentido das linhas de força será o mesmo dos dedos que envolvem o condutor.

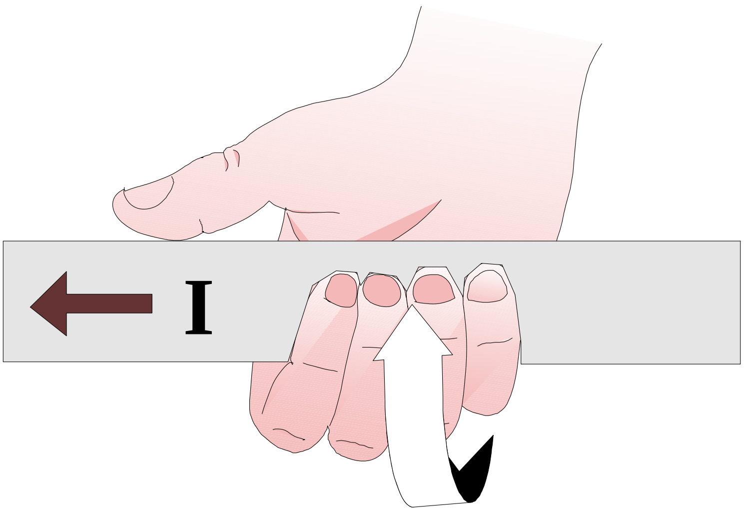


Fig.14 Regra da mão direita.

Pode-se também utilizar a **regra do saca-rolha** como forma de definir o sentido das linhas de força.

O sentido das linhas de força é dado pelo movimento do cabo de um saca-rolha, cuja ponta avança no condutor no mesmo sentido da corrente (convencional), como ilustrado na **Fig.15**.

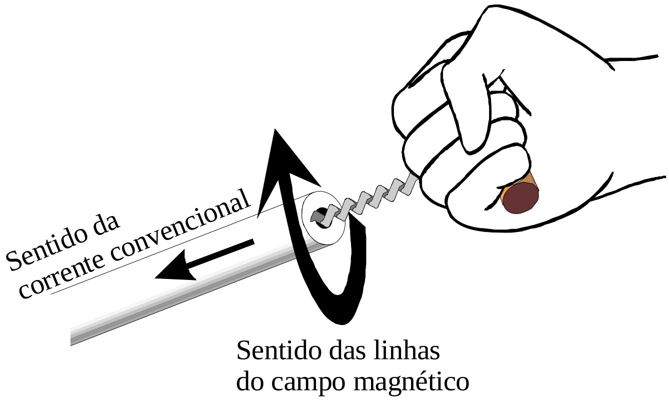


Fig.15 Regra do saca rolha.

A intensidade do campo magnético ao redor depende da intensidade da corrente que flui no condutor, como pode ser visto na **Fig.16**.

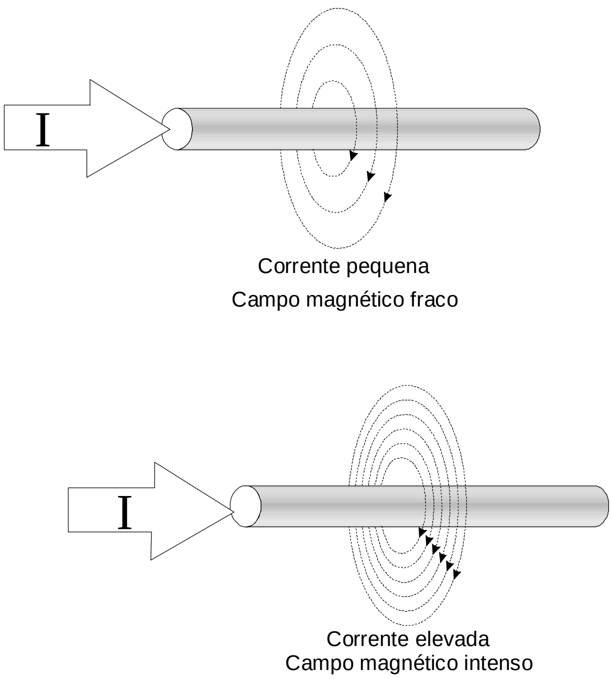


Fig.16 Relação entre intensidade de campo magnético e corrente.

A intensidade do campo magnético ao redor de um condutor é diretamente proporcional à corrente que circula nesse condutor.

CAMPO MAGNÉTICO EM UMA BOBINA

Para obter campos magnéticos de maior intensidade a partir da corrente elétrica, usa-se enrolar o condutor em forma de espirais, constituindo uma bobina. A **Fig.17** mostra uma boina e o seu símbolo.

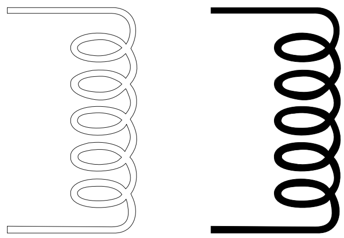


Fig.17 Bobina e seu símbolo.

As bobinas permitem uma soma dos efeitos magnéticos gerados em cada uma das **espiras**.

Enrolando-se um condutor em forma de espiras, constrói-se uma bobina. Esta permite a soma dos efeitos magnéticos no condutor.

A **Fig.18** mostra uma bobina constituída por várias espiras, ilustrando o efeito resultante da soma dos efeitos individuais.

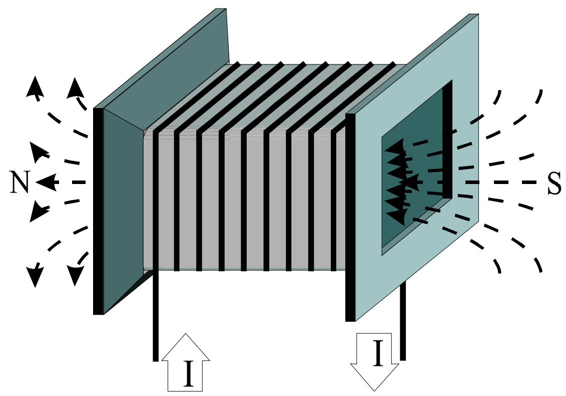


Fig.18 Bobina de várias espiras.

Os pólos magnéticos formados pelo campo magnético têm características semelhantes àquelas dos pólos de um ímã natural.

A intensidade do campo magnético em uma bobina depende diretamente da intensidade da corrente e do número de espiras, como pode ser visto na **Fig.19**.

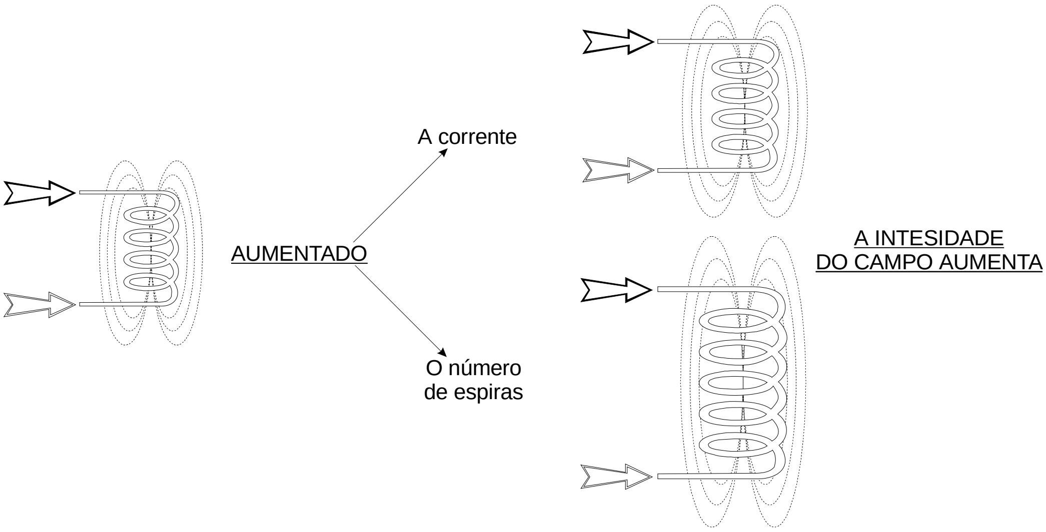


Fig.19 Relação entre intensidade de campo a corrente e o número de espiras.

BOBINAS COM NÚCLEO

O núcleo é a parte central das bobinas. Quando nenhum material é colocado no interior da bobina, diz-se que o núcleo é de ar.

Para obter uma maior intensidade de campo magnético a partir de uma mesma bobina, pode-se utilizar o recurso de colocar um material ferroso (ferro, aço etc.) no interior da bobina.

Nesse caso, o conjunto bobina - núcleo de ferro ilustrado na **Fig.20** recebe a denominação de eletroímã.

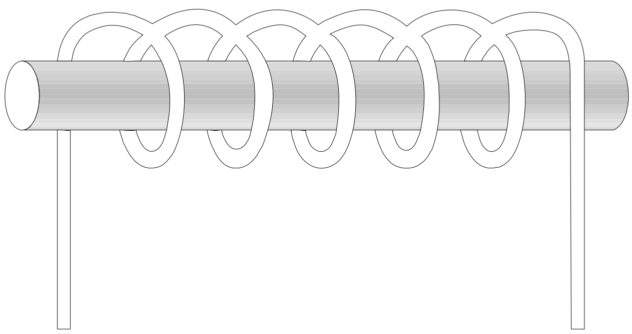


Fig.20 Eletroímã.

A maior intensidade do campo magnético nos eletroímãs se deve ao fato de que os materiais ferrosos provocam uma concentração das linhas de força.

A colocação de um núcleo de material ferroso no interior de uma bobina provoca uma intensificação no seu campo magnético.

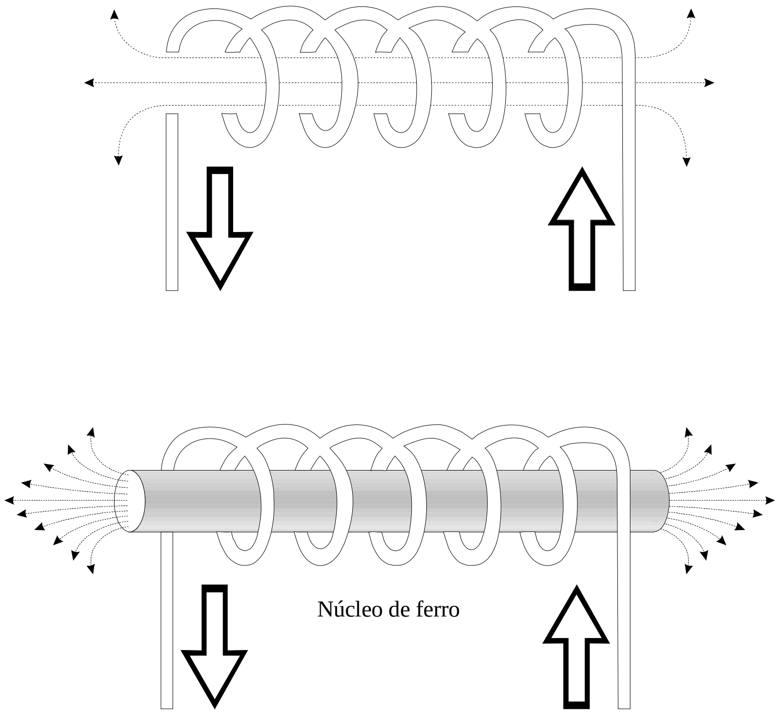


Fig.21 Influência do núcleo de ferro.

Quando uma bobina tem núcleo de material ferroso seu símbolo expressa essa condição, como ilustrado na **Fig.22**.

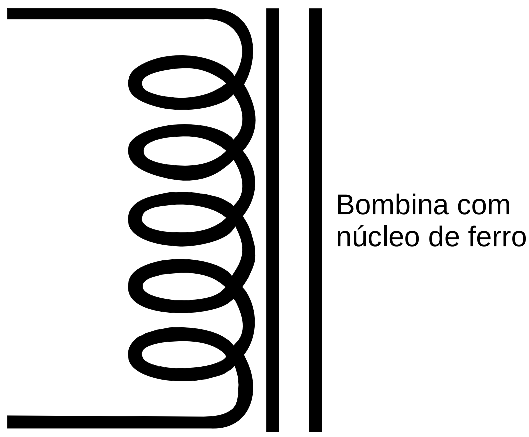


Fig.22 Símbolo de uma bobina com núcleo de ferro.

A capacidade de um material de concentrar as linhas de força é expressa pela **permeabilidade magnética** e é representada pela letra grega μ (mi).

De acordo com a permeabilidade magnética, os materiais podem ser classificados como: diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos.

DIAMAGNÉTICOS

Permeabilidade pequena (menor que 1) e negativa. Estes materiais promovem uma dispersão do campo magnético, como ilustrado na **Fig.23**.

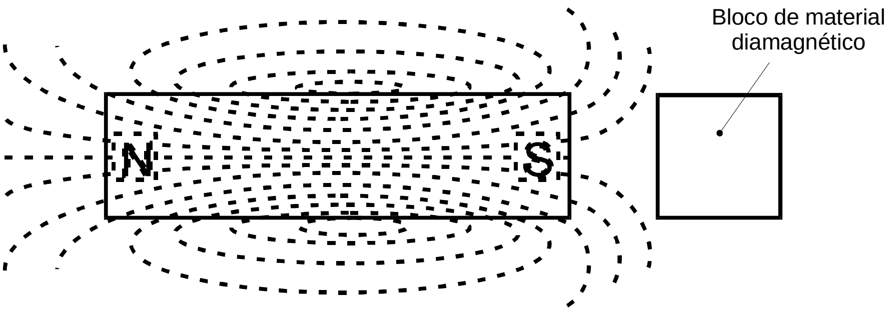


Fig.23 Materiais diamagnéticos.

São exemplos de materiais diamagnéticos o cobre e o ouro.

PARAMAGNÉTICOS

Permeabilidade em torno da unidade. São materiais que praticamente não alteram o campo magnético (não dispersam nem concentram as linhas de força), como pode ser visto na **Fig.24**.

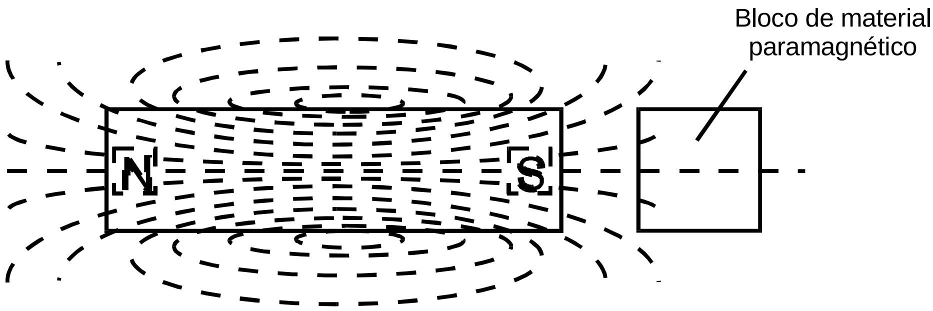


Fig.24 Materiais paramagnéticos.

São exemplos de materiais paramagnéticos o ar e o alumínio.

FERROMAGNÉTICOS

São materiais com alta permeabilidade. Se caracterizam por promoverem uma concentração das linhas magnéticas, como mostrado na **Fig.25**.

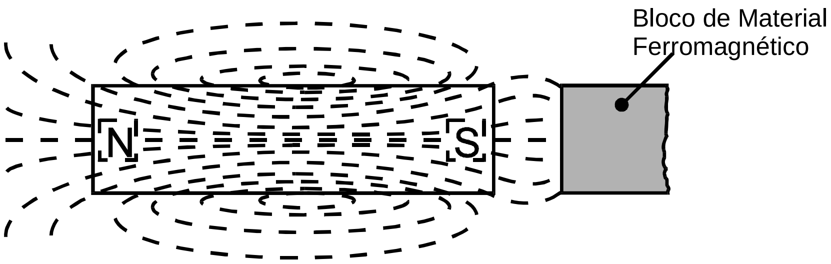


Fig.25 Materiais ferromagnéticos.

Os materiais ferromagnéticos são atraídos pelos campos magnéticos.

MAGNETISMO REMANESCENTE

Quando se coloca um núcleo de ferro em uma bobina na qual circula uma corrente elétrica, o núcleo se torna imantado porque as suas moléculas se orientam conforme as linhas de força criadas pela bobina. Este fenômeno pode ser visto na **Fig.26**.

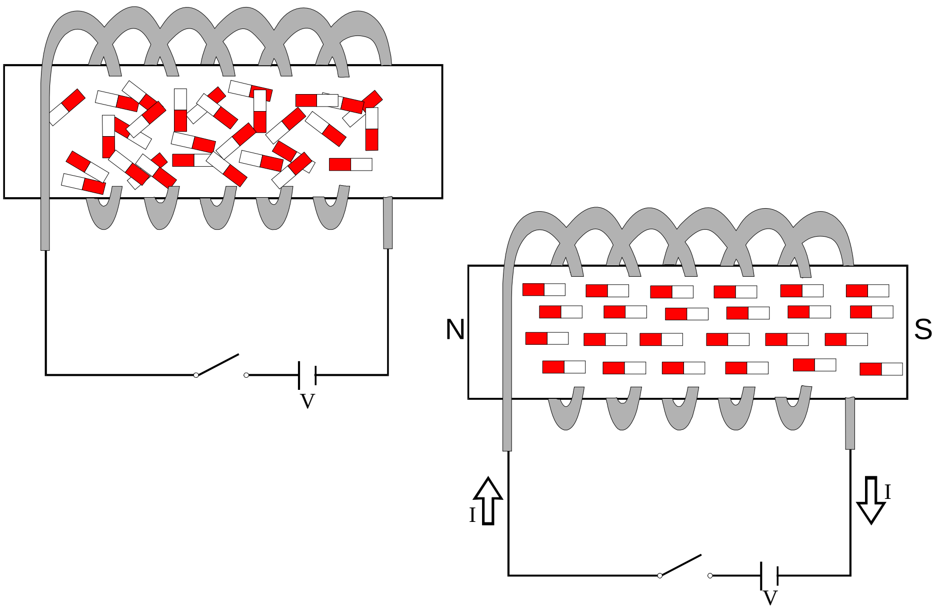


Fig.26 Imantação do núcleo de uma bobina.

Cessada a passagem da corrente, alguns ímãs moleculares permanecem na posição de orientação anterior, fazendo com que o núcleo permaneça ligeiramente imantado. Essa pequena imantação é denominada de **magnetismo remanescente ou residual**, como ilustrado na **Fig.27**.

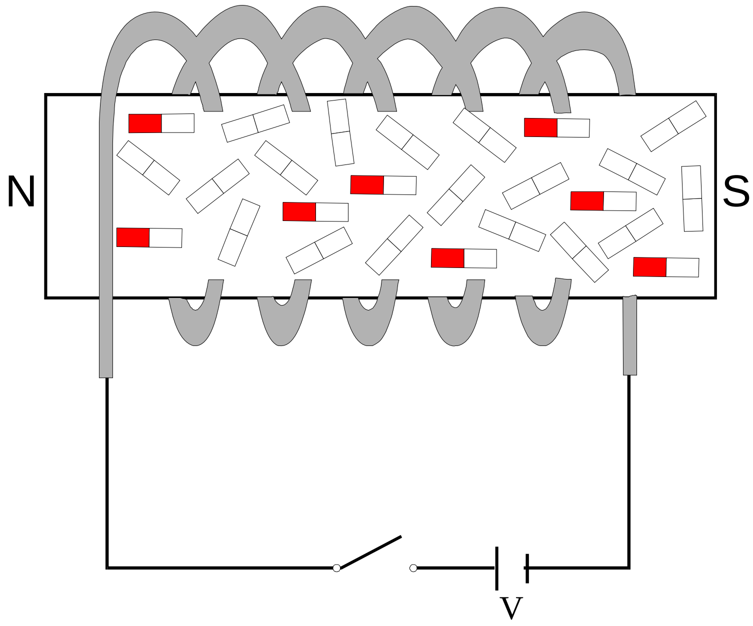


Fig.27 Magnetismo residual.

O magnetismo residual é importantíssimo, principalmente para os geradores de energia elétrica. Esse tipo de ímã é denominado de ímã temporário.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. O que são imãs naturais ?
2. O que se entende por pólos magnéticos e como se denominam ?
3. O que afirma a propriedade da inseparabilidade dos pólos ?
4. Como se comportam os pólos magnéticos iguais ?
5. Como a circulação de uma corrente em um condutor origina um campo magnético ?

BIBLIOGRAFIAS

LANG, JOHANNES. **O campo magnético**: EP 04 Das magnetische Feld Trad. e adapt. pelo Setor de Divulgação Tecnológica, Siemens. 2.ª ed., São Paulo, Siemens/Edgard Blücher, 1977, 67p.

SENAI/DN. **Magnetismo**. Rio de Janeiro, Divisão de Ensino e Treinamento, 1980, 49p. (Módulo Instrucional - Eletricidade; Eletrotécnica, 11).

SENAI/DN. **Eletromagnetismo**. Rio de Janeiro, Divisão de Ensino e Treinamento, 1980, 69p. (Módulo Instrucional - Eletricidade; Eletrotécnica, 12).

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

No *SENAI* a Formação Profissional está voltada para a Educação permanente e a cidadania.

Introdução

O campo de aplicação dos indutores se estende desde circuitos de lazer como os filtros para caixas de som até os circuitos industriais, passando pelo campo da transmissão e recepção de sinais de rádio e televisão.

O fascículo tratará dos indutores em si, dos fenômenos ligados ao magnetismo que ocorrem no indutor, e do seu comportamento em corrente alternada.

O objetivo deste fascículo é fornecer todas as informações sobre indutores necessárias para que o leitor possa utilizá-los corretamente.

Para ter sucesso no desenvolvimento do conteúdo e atividades deste fascículos, o leitor já deverá ter conhecimentos relativos a:

- Magnetismo e eletromagnetismo.

Indução

O princípio da geração de energia elétrica baseia-se no fato de que toda vez que um condutor se movimenta no interior de um campo magnético aparece neste condutor uma diferença de potencial.

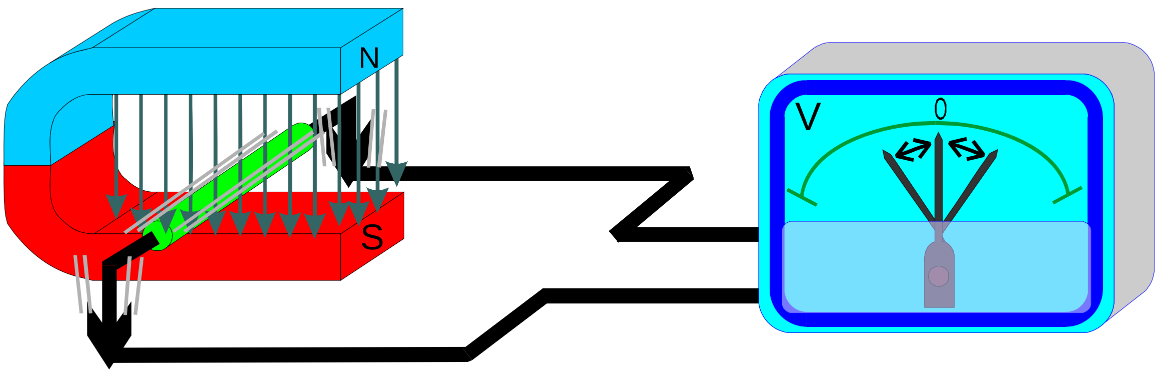


Fig.1 Geração de uma tensão num condutor movendo-se numa região de campo magnético.

Esta tensão gerada pelo movimento do condutor no interior de um campo magnético é denominada de **tensão induzida**.

Foi o cientista inglês **Michael Faraday**, ao realizar estudos com o eletromagnetismo, que determinou as condições necessárias para que uma tensão seja induzida em um condutor.

As observações de **Faraday** podem ser resumidas em duas conclusões:

- Quando um condutor elétrico é sujeito a um campo magnético variável, tem origem nesse condutor uma tensão induzida.

É importante notar que, para existir um campo magnético variável no condutor, um ou outro procedimento a seguir é indicado :

a) Manter o campo magnético estacionário e movimentar o condutor perpendicularmente ao campo, como ilustrado na **Fig.2a**.

b) Manter o condutor estacionário e movimentar o campo magnético, conforme ilustrado na **Fig.2b**.

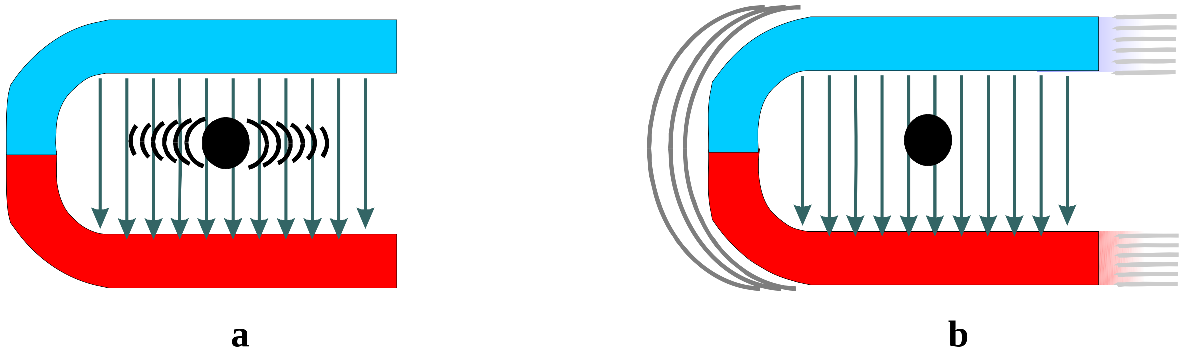


Fig.2 Campo magnético variável : (a) movimento do condutor e (b) movimento do campo magnético.

- A magnitude da tensão induzida é diretamente proporcional à intensidade do fluxo magnético e à razão de sua variação.

Isto significa que, quanto mais intenso o campo, maior é a tensão induzida. Por outro lado, quanto maior for a variação do campo, maior será essa tensão induzida.

Os geradores elétricos de energia elétrica se baseiam nos princípios estabelecidos por Faraday.

AUTO-INDUÇÃO

O fenômeno de indução faz com que o comportamento das bobinas em um circuito de corrente contínua seja diferente do comportamento dos resistores.

Em um circuito formado por uma fonte de corrente contínua, um resistor e uma chave, a corrente atinge o seu valor máximo instantaneamente no momento em que o interruptor é ligado. Se, nesse mesmo circuito, o resistor for substituído por uma bobina o comportamento será diferente. A corrente atinge o valor máximo algum tempo após a ligação do interruptor. A **Fig.3** ilustra esse comportamento.

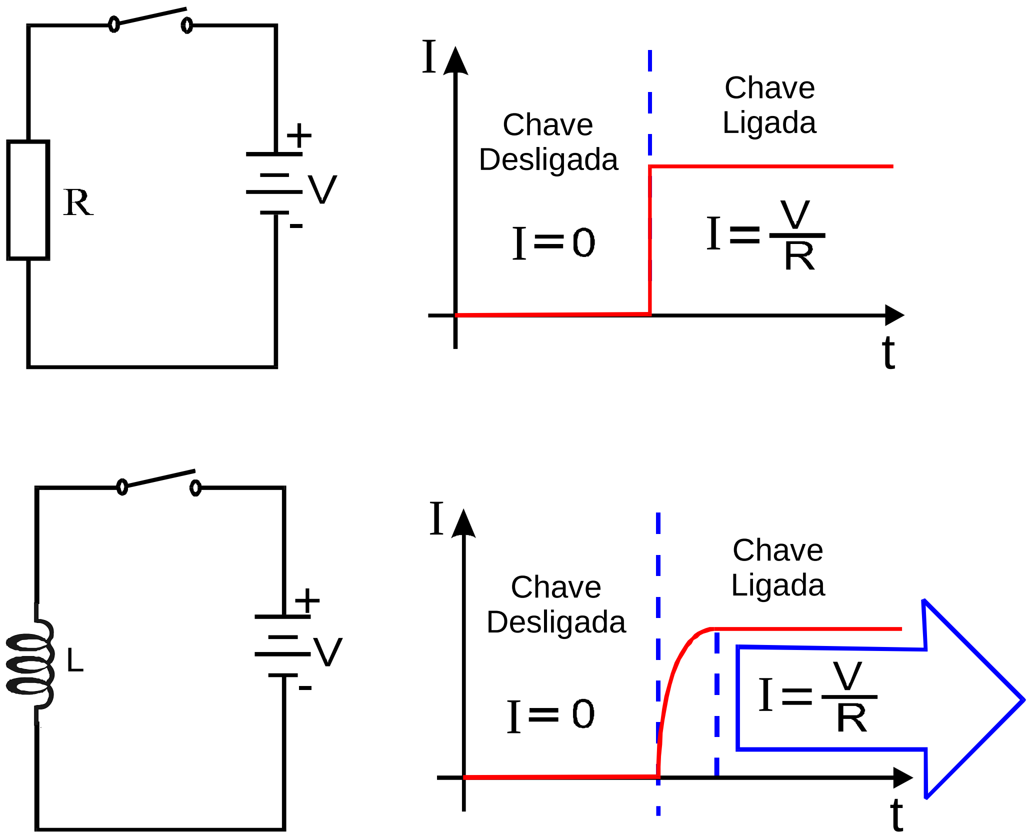


Fig.3 Comportamento da corrente que percorre um resistor e da que percorre um indutor.

Esse atraso para atingir a corrente máxima se deve à indução e pode ser mais bem compreendido imaginando o comportamento do circuito passo a passo.

Suponha o circuito composto por uma bobina, uma fonte de CC e uma chave, como ilustrado na **Fig.4**.

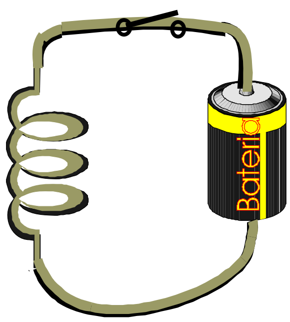


Fig.4 Circuito formado por uma bateria, uma bobina e uma chave.

Enquanto a chave está desligada, não há campo magnético ao redor das espiras porque não há corrente circulante.

A **Fig.5** mostra apenas a bobina em destaque, com algumas espiras representadas em corte.

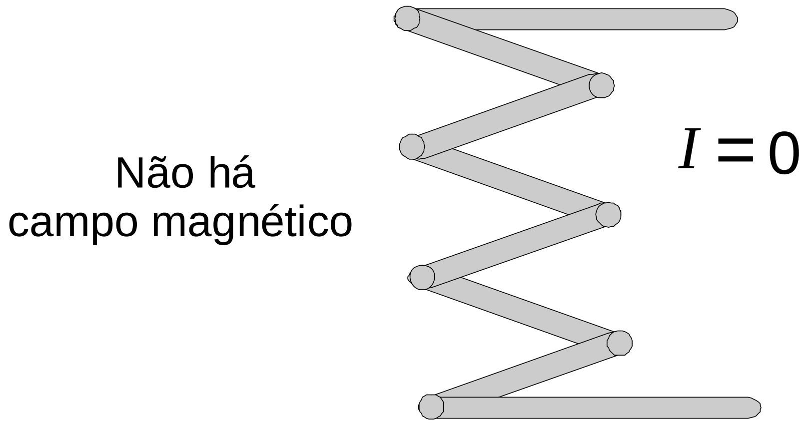


Fig.5 Bobina em corte.

No momento em que a chave é fechada, inicia-se a circulação de corrente na bobina.

Com a circulação da corrente, surge o campo magnético ao redor de suas espiras, como ilustrado na **Fig.6**.

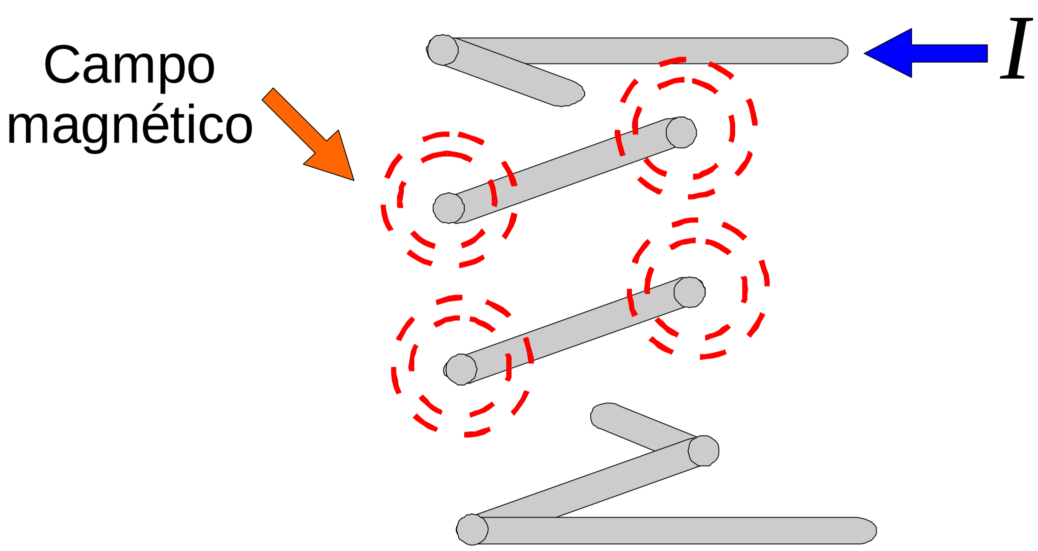


Fig.6 Campo magnético ao redor das espiras.

Na medida em que a corrente cresce em direção ao valor máximo o campo magnético nas espiras se expande, como pode ser visto na **Fig.7**.

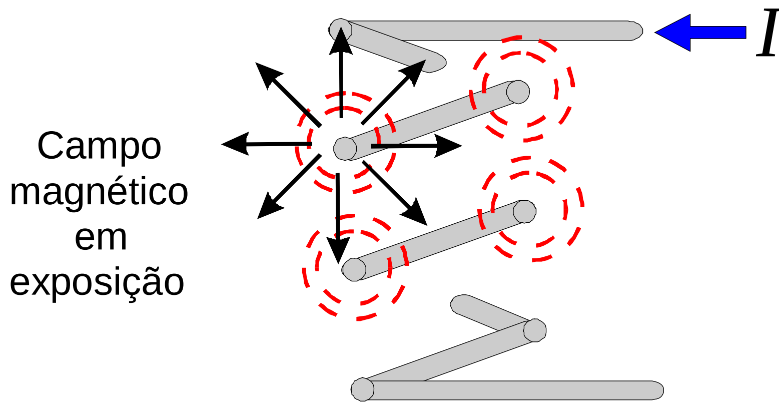


Fig.7 Expansão do campo magnético com o crescimento da corrente.

Ao se expandir, o campo magnético em movimento gerado em uma espira corta a espira colocada ao lado, como mostrado na **Fig.8**.

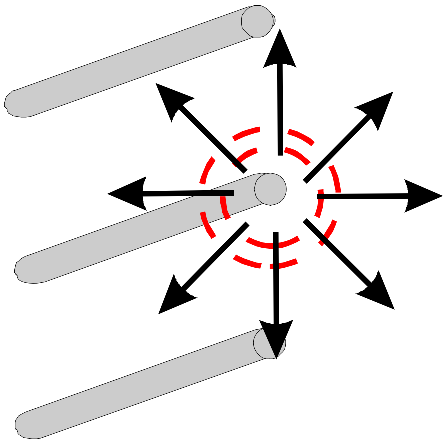


Fig.8 Campo magnético atingindo mais espiras.

Conforme Faraday enunciou, induz-se nessa espira cortada pelo campo em movimento uma determinada tensão. Cada espira da bobina induz nas espiras vizinhas uma tensão elétrica.

Isso significa que a aplicação de tensão em uma bobina provoca o aparecimento de um campo magnético em expansão que gera na própria bobina uma tensão induzida.

Esse fenômeno que consiste em uma bobina induzir sobre si mesma uma tensão é denominado de **auto-indução**.

A tensão gerada na bobina por auto-indução tem uma característica importante: tem **polaridade oposta** àquela tensão que é aplicada aos seus terminais, razão pela qual é denominada de **força contra eletromotriz (*fcem*).**

Ao ligar a chave, aplica-se tensão à bobina com uma determinada polaridade. A auto-indução gera na bobina uma tensão induzida (***fcem***) de polaridade oposta à da tensão aplicada, como ilustrado na **Fig.9**.

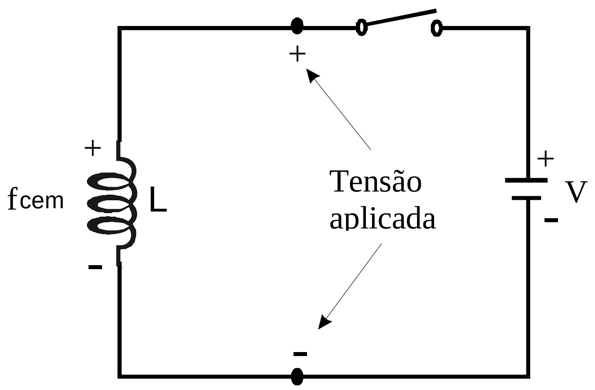


Fig.9 Geração da tensão induzida de polaridade oposta.

Representando a ***fcem*** como uma **bateria** existente no interior da própria bobina, o circuito se apresenta conforme mostrado na **Fig.10**.

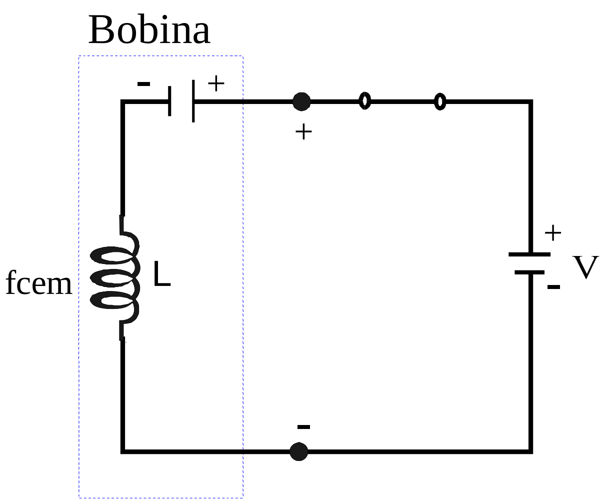


Fig.10 Representação da ***fcem***.

Como ***fcem*** atua contra a tensão da fonte, a tensão aplicada à bobina é na realidade:

$$V_{resultante} = V_{fonte} - fcem \qquad (1)$$

A corrente no circuito é causada por essa tensão resultante.

$$I = \frac{(V - fcem)}{R} \quad (2)$$

Como a ***fcem*** existe apenas durante a variação do campo magnético gerado na bobina, quando o campo magnético atinge o valor máximo a ***fcem*** deixa de existir e a corrente atinge o seu valor máximo.

O gráfico da **Fig.11** mostra detalhadamente esta situação.

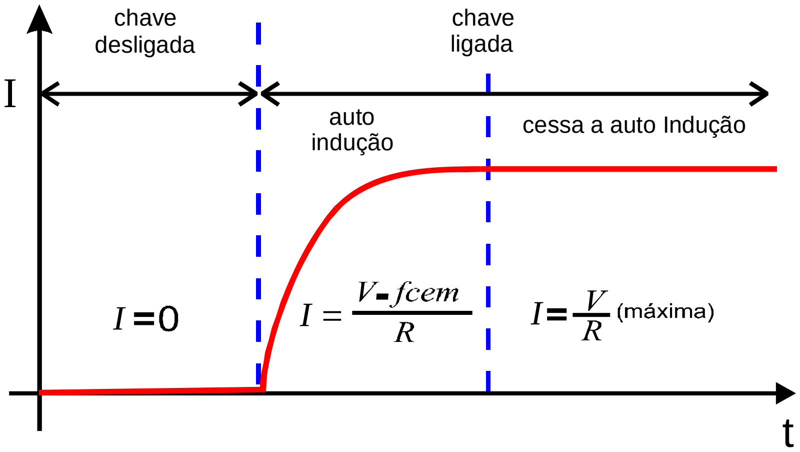


Fig.11 Evolução da corrente no circuito constituído por uma bobina e uma fonte quando a chave é ligada.

O mesmo fenômeno ocorre quando a chave é desligada. A contração do campo induz uma ***fcem*** na bobina retardando o decréscimo da corrente, como ilustrado na **Fig.12**.

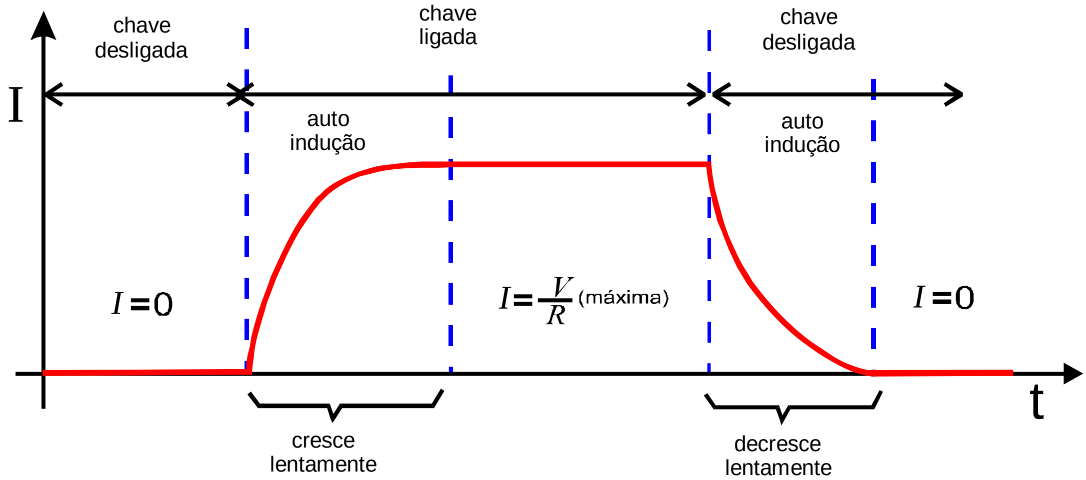


Fig.12 Evolução da corrente no circuito constituído por uma bobina e uma fonte quando a chave é desligada.

Em resumo, pode-se dizer que a auto-indução faz com que as bobinas tenham uma característica singular: **uma bobina se opõe a variações bruscas de corrente**.

Esta capacidade de se opor as variações de corrente é denominada de **indutância** e é representada pela letra L.

A unidade de medição da indutância é o henry, representado pela letra H.

A unidade de medição de indutância henry tem submúltiplos muito utilizados em Eletrônica. A **Tabela 1** mostra a relação entre os submúltiplos e a unidade.

Tabela 1 Submúltiplos do henry.

Submúltiplos	Valor com relação ao henry
Milihenry (mH)	10^{-3} H ou 0,001H
Microhenry (μH)	10^{-6}H ou 0,000001H

A indutância de uma bobina depende de diversos fatores:

- Do núcleo (material, seção e formato).
- Do número de espiras.
- Do espaçamento entre as espiras.
- Do condutor (tipo e seção).

Por apresentarem uma indutância, as bobinas são também denominadas de indutores.

Os indutores podem ter as mais diversas formas, podendo inclusive ser parecidos com um transformador, como pode ser visto na **Fig.13**.

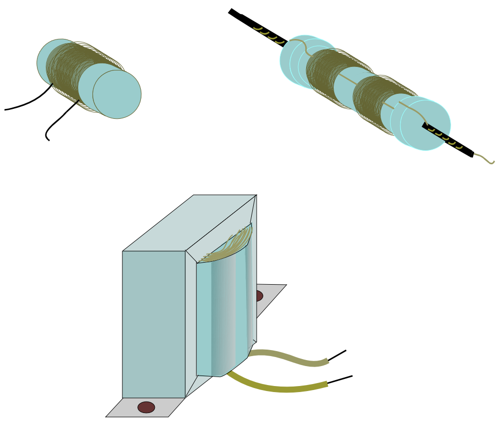


Fig.13 Algumas formas de indutores.

Indutores em corrente alternada

Quando se usa um indutor em um circuito de corrente contínua, a sua indutância se manifesta apenas nos momentos em que existe variação de corrente.

Já em corrente alternada, como os valores de tensão e corrente estão em constante modificação, o efeito da indutância se manifesta permanentemente.

Essa manifestação permanente da **oposição a circulação de uma corrente variável** é denominada de **reatância indutiva**, representada pela notação X_L.

Reatância indutiva é a oposição que um indutor apresenta à circulação de corrente alternada.

Em outras palavras, reatância é a resistência de um indutor em corrente alternada.

A reatância indutiva é expressa em ohms e pode ser determinada através da equação:

$$X_L = 2\pi \times f \times L \qquad (3)$$

onde X_L é a reatância indutiva em Ω, 2π é uma constante, f é a freqüência da corrente alternada e L a indutância do indutor em henry.

Exemplo 1:

Determinar a reatância de um indutor de 600mH usado em uma rede de *ca* de 60Hz.

Solução:

$$X_L = 2\pi \times f \times L = 6{,}28 \times 60 \times 0{,}6$$

$$X_L = 226{,}08\ \Omega$$

É importante observar que a reatância indutiva de um indutor não depende da tensão aplicada aos seus terminais.

A corrente I_L que circula em um indutor em CA pode ser calculada com base na Lei de Ohm, substituindo-se R por X_L.

$$I_L = \frac{V}{X_L} \tag{4}$$

onde I_L é a corrente eficaz no indutor em ampère, V a tensão eficaz em volts e X_L a reatância indutiva em ohms.

Exemplo 2:

O indutor de 60mH usado em uma rede de 60Hz e 110V permite a circulação de uma corrente de que intensidade ?

Solução:

$$X_L = 2\pi \times f \times L = 6{,}28 \times 60 \times 0{,}6$$

$$X_L = 226{,}08\ \Omega$$

$$I_L = \frac{V}{X_L} = \frac{110}{226{,}08}$$

$$I_L = 486\text{mA}$$

FATOR DE QUALIDADE (*Q*)

Todo o indutor apresenta, além da reatância indutiva, uma resistência ôhmica que se deve ao condutor com o qual é construído.

O fator de qualidade Q é uma relação entre a reatância indutiva e a resistência ôhmica de um indutor.

$$Q = \frac{X_{\mathrm{L}}}{R} \qquad (5)$$

onde Q é o fator de qualidade, X_{L} a reatância indutiva e R a resistência ôhmica da bobina.

Um indutor ideal deveria apresentar resistência ôhmica nula. Isto determinaria um fator de qualidade infinitamente grande. No entanto, na prática, esse indutor não existe, visto que sempre existe a resistência ôhmica do condutor.

Exemplo 3:

Determinar o fator de qualidade de um indutor com reatância indutiva de 3.768 Ω (indutor de 10H em 60Hz) e com resistência ôhmica de 80 Ω.

Solução:

$$Q = \frac{X_{\mathrm{L}}}{R} = \frac{3.768}{80}$$

$$Q = 47{,}1$$

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA INDUTÂNCIA DE UM INDUTOR

Quando se deseja utilizar um indutor e sua indutância, é possível determiná-la aproximadamente por um processo experimental. O valor encontrado não será exato porque é necessário considerar que o indutor é ideal (R = 0).

Aplica-se ao indutor uma corrente alternada com freqüência e tensão conhecidas. Em seguida, determina-se a corrente do circuito com um amperímetro de corrente alternada, como pode ser visto na **Fig.14**.

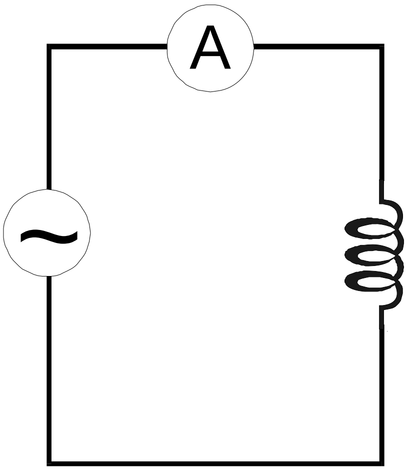


Fig.14 Determinação experimental de uma indutância.

Conhecidos os valores de tensão e corrente do circuito, determina-se a reatância indutiva do indutor de acordo com a **Eq.(4)** :

$$X_L = \frac{V}{I_L}$$

onde V é a tensão do indutor e I_L a corrente.

Aplica-se o valor encontrado na **Eq.(3)** da reatância indutiva e determina-se a indutância:

$$X_L = 2\pi \times f \times L$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi \times f}$$

A imprecisão do valor encontrado não é significativa na prática porque os valores de resistência ôhmica da bobina são pequenos, comparados com a sua reatância indutiva (alto Q).

Associação de indutores

Os indutores podem ser associados em série, em paralelo e até mesmo de forma mista, embora esta última não seja muito utilizada.

A associação série é utilizada como forma de obter-se uma maior indutância. A indutância de uma associação série é dada pela equação:

$$L_T = L_1 + L_2 + ... + L_n \quad (6)$$

onde L_T é a indutância total e L_1, L_2 ...L_n as indutâncias associadas.

A **Fig.15** mostra uma associação série de indutores e sua representação esquemática.

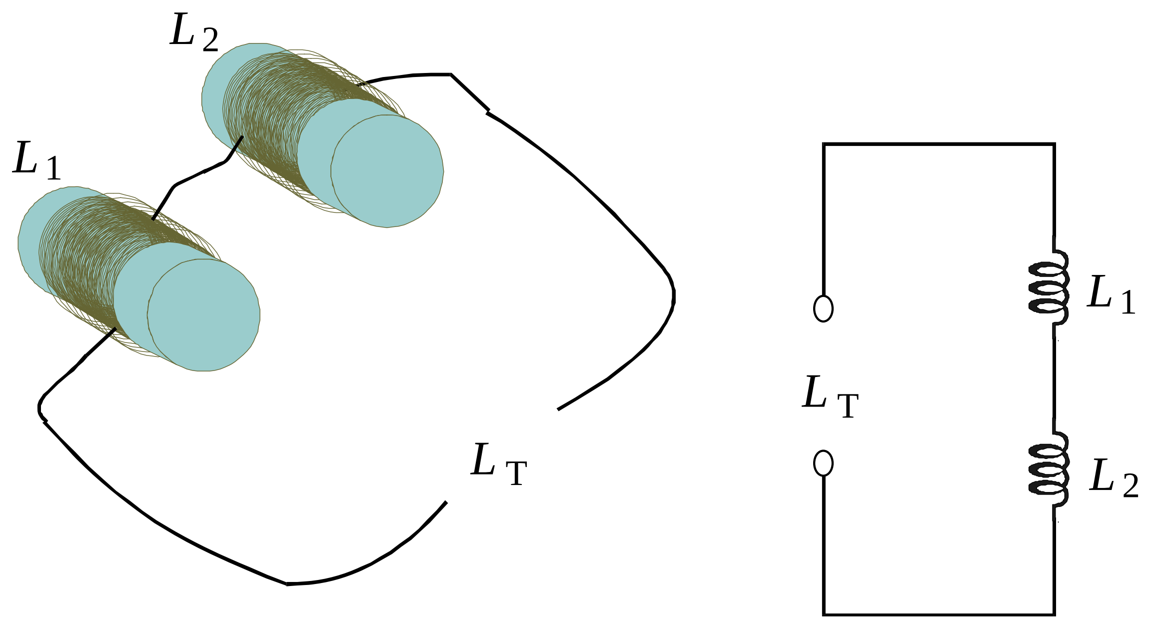


Fig.15 Associação série de indutores e sua representação.

A associação paralela pode ser utilizada como forma de se obterem indutâncias menores ou como forma de dividir uma corrente entre diversos indutores.

A indutância total de uma associação paralela de indutores é dada pela equação:

$$L_T = \frac{1}{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \ldots + \frac{1}{L_n}} \qquad (7)$$

onde L_T é a indutância total e L_1, L_2,…L_n as indutâncias associadas.

Observa-se que as equações para cálculo da indutância se assemelham às equações para o cálculo de associações de resistores.

RELAÇÃO DE FASE ENTRE CORRENTE E TENSÃO NOS INDUTORES

Devido ao fenômeno de auto-indução, ocorre uma defasagem entre corrente e tensão nos indutores ligados em CA.

A auto-indução provoca um atraso na corrente em relação à tensão. Esse atraso é de 90º (um quarto de ciclo).

Nos indutores, a corrente está 90° atrasada em relação à tensão.

A representação senoidal desse fenômeno é ilustrada na **Fig.16**. Observa-se que a tensão atinge o máximo antes da corrente.

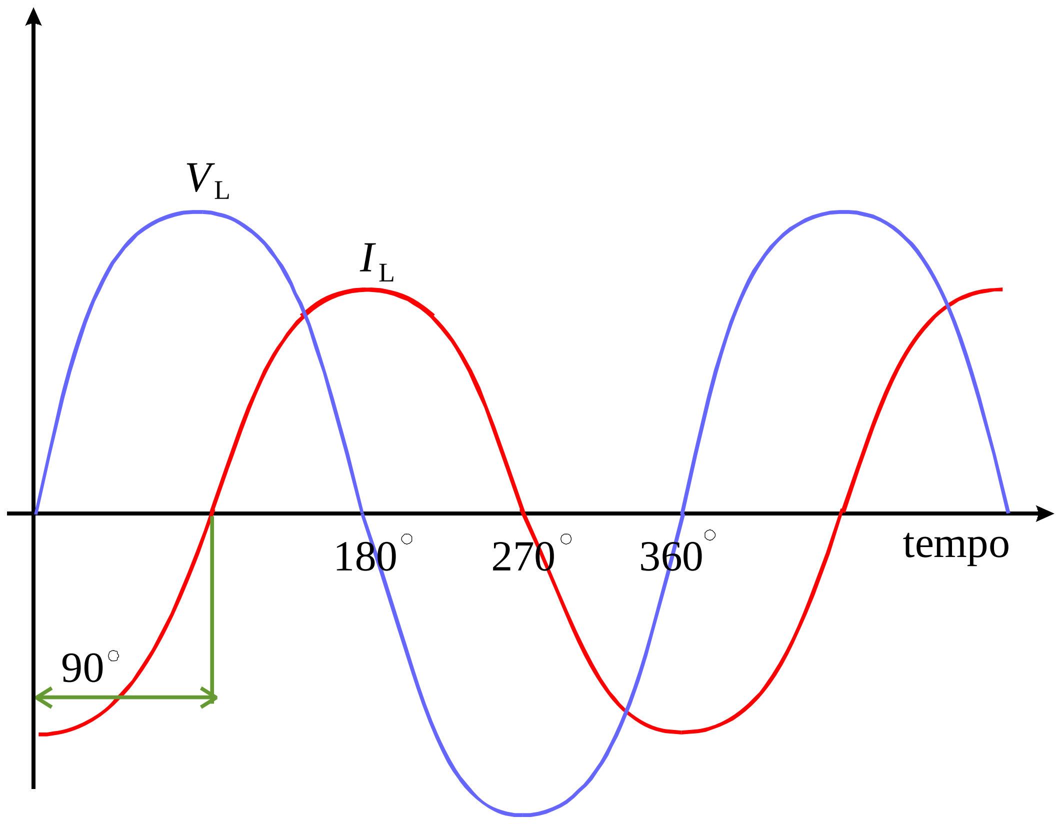


Fig.16 Defasagem entre corrente e tensão nos indutores.

Pode-se representar essa defasagem por meio de um diagrama fasorial. O ângulo entre os segmentos de reta representa a defasagem e o comprimento representa os valores de V_L e I_L, como ilustrado na **Fig.17**.

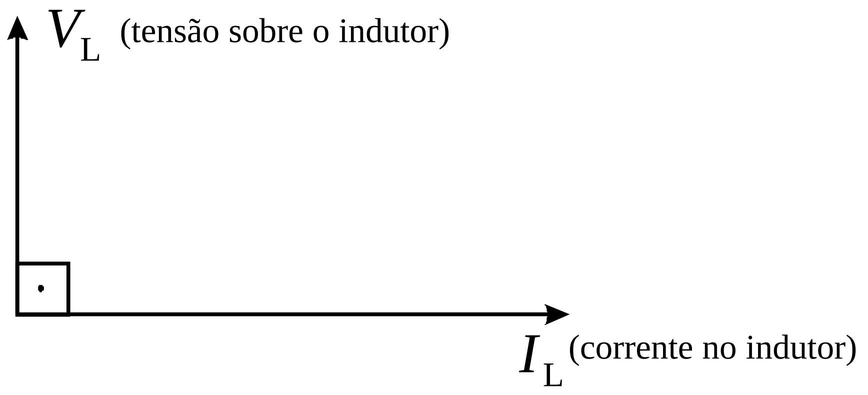


Fig.17 Diagrama fasorial da defasagem entre corrente e tensão nos indutores.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Quais as condições necessárias para que uma tensão seja induzida em condutor ?

2. O que se entende por indutância e qual a sua unidade de medição?

3. O que é reatância indutiva?

BIBLIOGRAFIA

DAWES, CHESTER L. **Curso de Eletrotécnica**, Corrente Alternada. A course in electrical engineering. Trad. de João Protásio Pereira da Costa. 18.ª ed., Porto Alegre, Globo, 1979, vol.4

SENAI/DN. **Impedância**. Rio de Janeiro, Divisão de Ensino e Treinamento, 1980 (Módulo Instrucional - Eletricidade ; eletrotécnica, 18).

VAN VALKENBURG, NOOGER & NEVILLE. **Eletricidade Básica**. 11.ª ed., Rio de Janeiro, Freitas Bastos, 1977, vol.3

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

A harmonia da atividade industrial com o meio ambiente é um dos objetivos do *SENAI*.

Introdução

Os aparelhos eletrônicos modernos são construídos para funcionar a partir da rede elétrica. Entretanto, a grande maioria desses aparelhos utiliza tensões baixas nos seus circuitos (6V, 12V, 15V etc). Um dos componentes que são utilizados para se obterem baixas tensões a partir das redes de 110V/220V é o transformador.

Essa larga utilização nos aparelhos torna necessário aos técnicos de eletrônica conhecer e compreender as características do transformador.

Este fascículo apresenta uma série de informações sobre os transformadores, visando a capacitá-lo a conectar, testar e especificar de forma tecnicamente correta esse dispositivo.

Para ter sucesso no desenvolvimento do conteúdo e atividades deste fascículo, o leitor já deverá ter conhecimentos relativos a:

- Corrente alternada.
- Indutores em corrente alternada.
- Relação de fases entre tensões.

Princípio de funcionamento do transformador

O transformador é um dispositivo que permite elevar ou rebaixar os valores de tensão ou corrente em um circuito de CA, como pode ser visto na **Fig.1**.

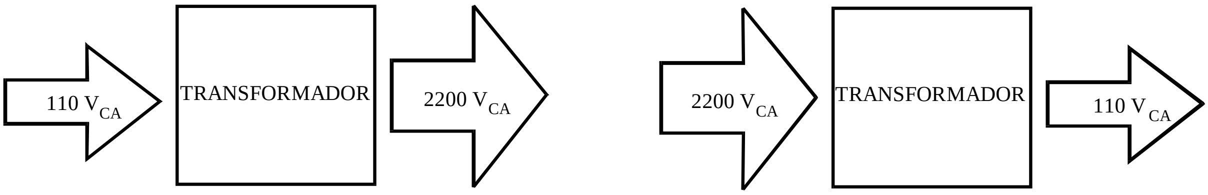


Fig.1 Função dos transformadores.

A grande maioria dos equipamentos eletrônicos emprega transformadores, seja como elevador ou rebaixador de tensões.

A **Fig.2** mostra alguns tipos de transformadores.

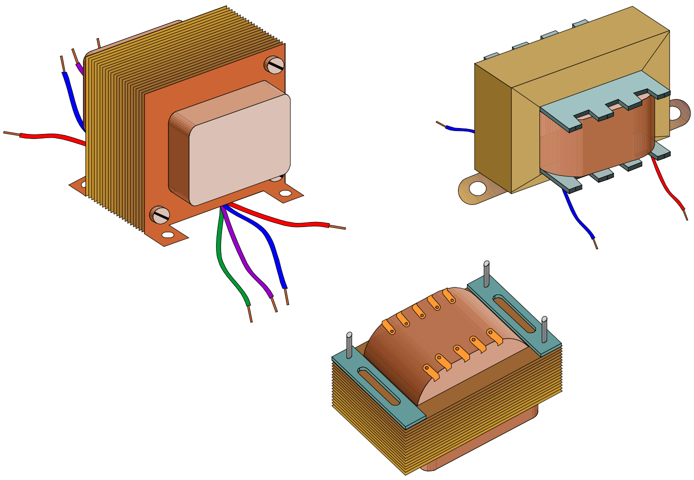


Fig.2 Tipos diferentes de transformador.

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Quando uma bobina é conectada a uma fonte de CA, surge um campo magnético variável ao seu redor.

Aproximando-se outra bobina da primeira, o campo magnético variável gerado na primeira bobina **corta** as espiras da segunda.

Como conseqüência da variação de campo magnético sobre suas espiras surge na segunda bobina uma tensão induzida, como pode ser visto na **Fig.3**.

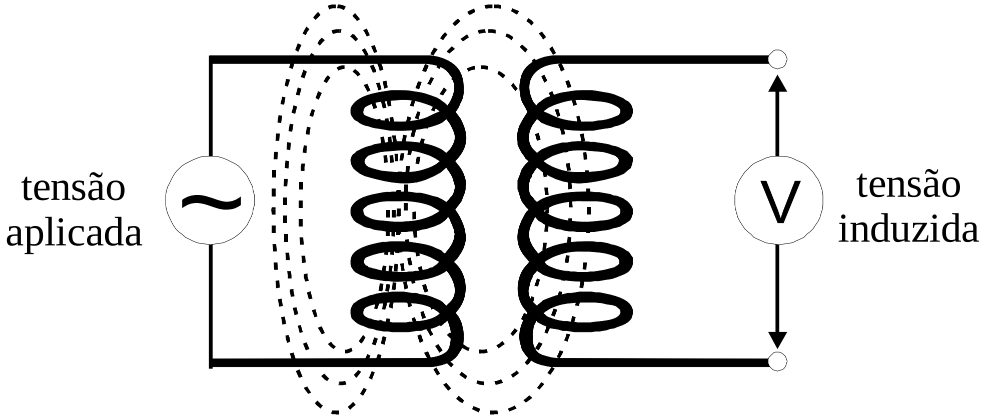


Fig.3 Tensão induzida na segunda bobina.

A bobina na qual se aplica a tensão CA é denominada de **primário do transformador**, e a bobina onde surge a tensão induzida é **denominada de secundário do transformador**, como mostrado na **Fig.4**.

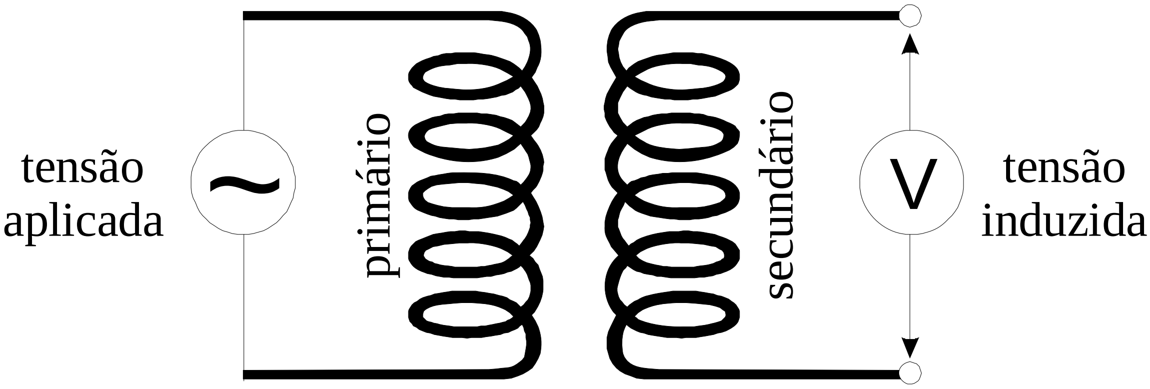


Fig.4 Primário e secundário de um transformador.

***A bobina do transformador em que se aplica uma tensão CA é denominada de primário e a bobina em que surge uma tensão induzida é denominada de secundário*.**

É importante observar que as bobinas primária e secundária são eletricamente isoladas entre si. A transferência de energia de uma para a outra se dá exclusivamente através das linhas de forças magnéticas.

A tensão induzida no secundário de um transformador é proporcional ao número de linhas magnéticas que corta a bobina secundária. Por essa razão, o primário e o secundário de um transformador são montados sobre um núcleo de material ferromagnético, como pode ser visto na **Fig.5**.

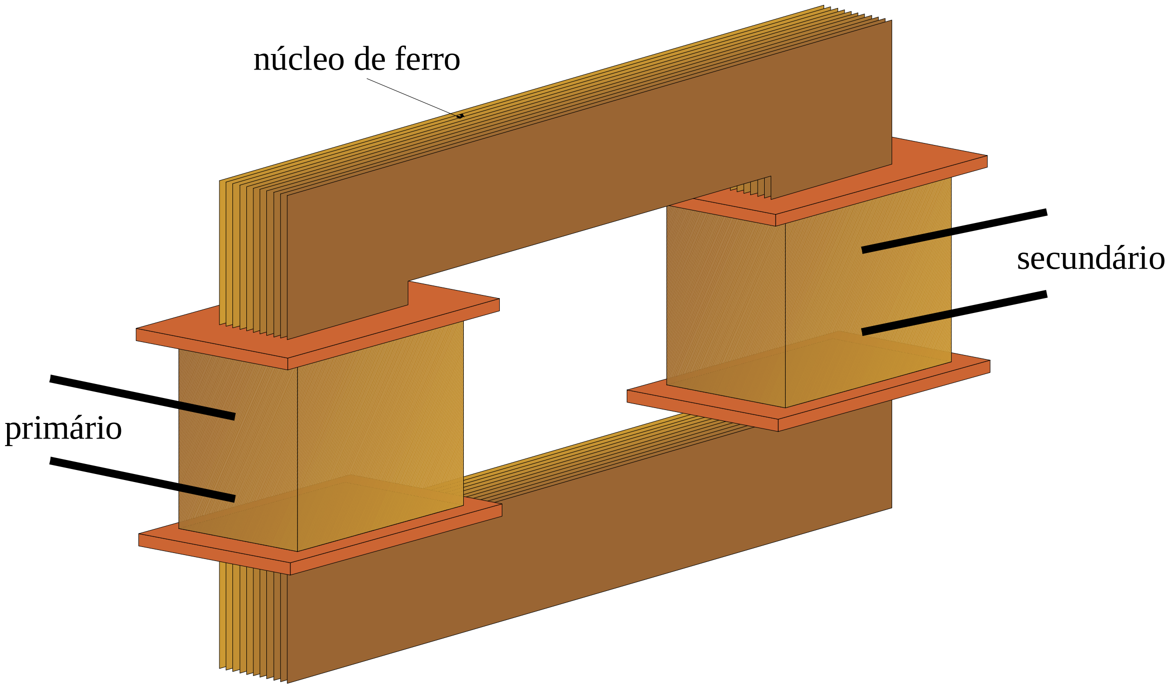


Fig.5 Núcleo de material ferromagnético.

O núcleo diminui a dispersão do campo magnético fazendo com que o secundário seja cortado pelo maior número de linhas magnéticas possível, obtendo uma melhor transferência de energia entre o primário e o secundário.

A **Fig.6** ilustra o efeito provocado pela colocação do núcleo no transformador.

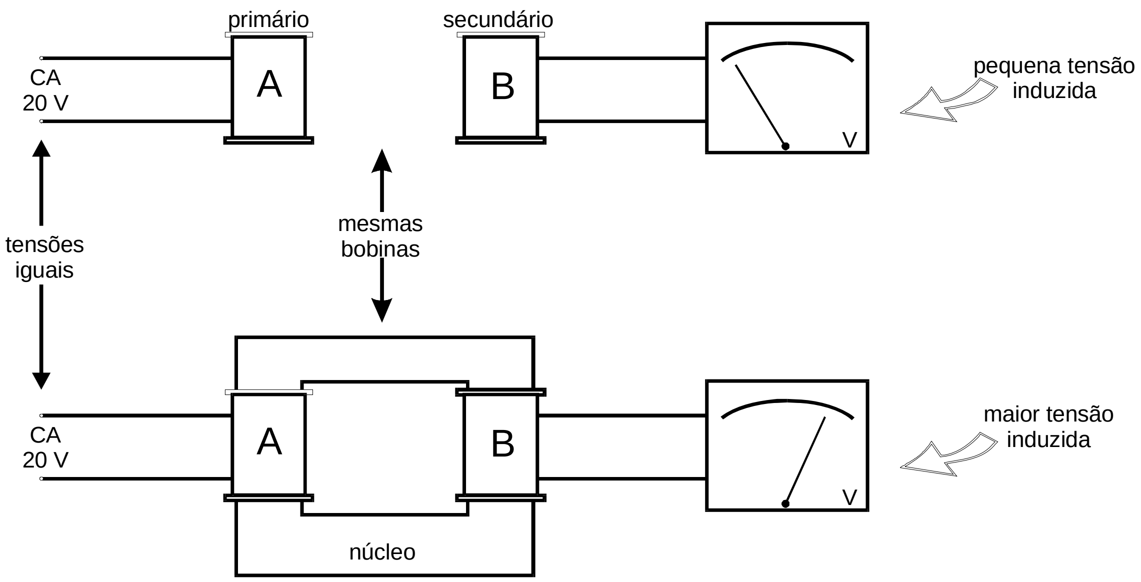


Fig.6 Efeito de núcleo no transformador.

Com a inclusão do núcleo, o aproveitamento do fluxo magnético gerado no primário é maior. Entretanto, surge um inconveniente: o ferro maciço sofre grande aquecimento com a passagem do fluxo magnético.

Para diminuir esse aquecimento, utiliza-se ferro silicoso laminado para a construção do núcleo. Com a laminação do ferro, reduzem-se as **correntes parasitas** responsáveis pelo aquecimento do núcleo.

O núcleo de um transformador é laminado para se reduzirem as correntes parasitas que provocam o seu aquecimento.

A laminação não elimina o aquecimento, mas reduz sensivelmente em relação ao ferro maciço.

A **Fig.7** mostra os símbolos empregados para representar o transformador, segundo a norma ABNT.

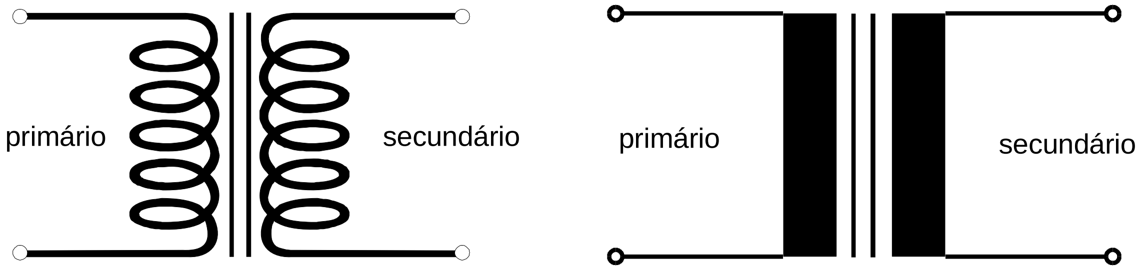


Fig.7 Símbolo do transformador.

Os traços colocados no símbolo entre as bobinas do primário e secundário indicam o núcleo de ferro laminado. O núcleo de ferro é empregado em transformadores que funcionam em baixas freqüências (50Hz, 60Hz, 120Hz).

Transformadores que funcionam em freqüências mais altas (kHz) geralmente são montados em núcleo de **ferrite**. A **Fig.8** mostra o símbolo de um transformador com núcleo de ferrite.

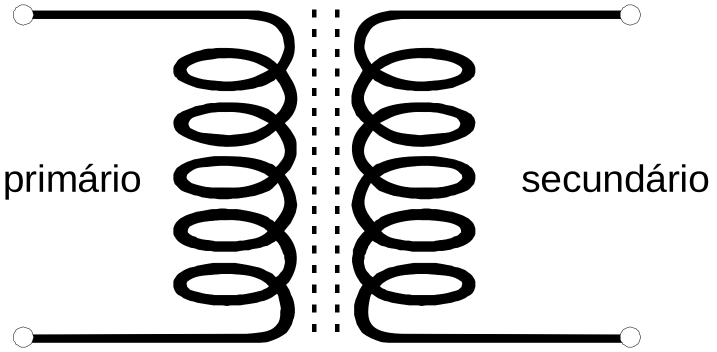


Fig.8 Símbolo do transformador com núcleo de ferrite.

TRANSFORMADORES COM MAIS DE UM SECUNDÁRIO

É possível construir transformadores com mais de um secundário, de forma a obter diversas tensões diferentes. Esses tipos de transformador podem ser vistos na **Fig.9**.

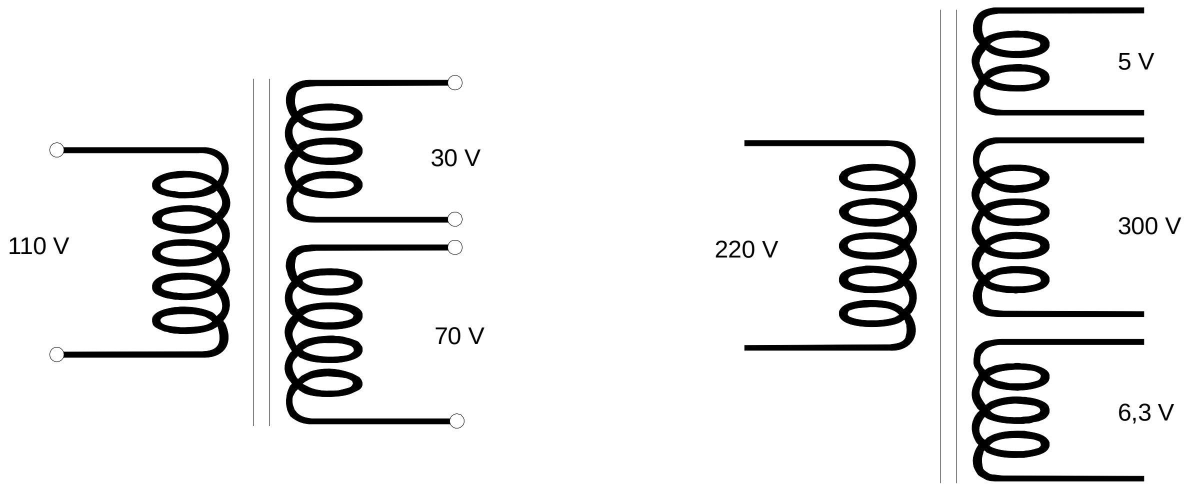


Fig.9 Transformadores com mais de um secundário.

Esse tipo de transformadores é muito utilizado em equipamentos eletrônicos.

Relação de transformação

A aplicação de uma tensão CA ao primário de um transformador resulta no aparecimento de uma tensão induzida no seu secundário.

Aumentando-se a tensão aplicada ao primário, a tensão induzida no secundário aumenta na mesma proporção.

Verifica-se para o caso do exemplo da **Fig.10** que a tensão do secundário é sempre a metade da tensão aplicada no primário.

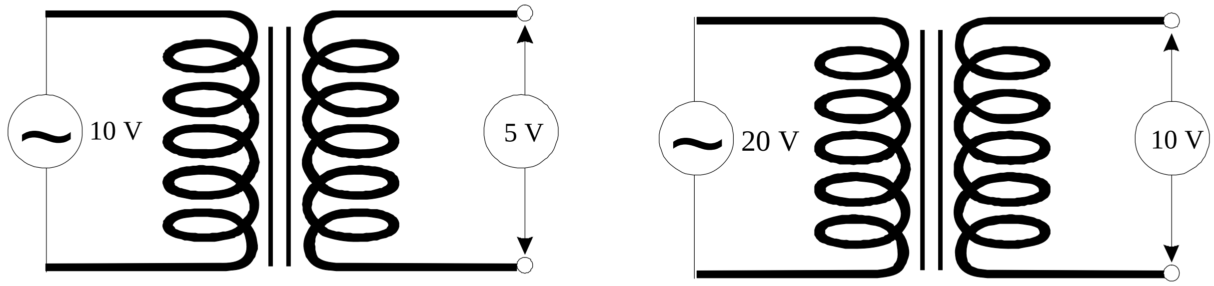


Fig.10 Transformador com tensão no secundário igual à metade da tensão no primário.

A relação entre as tensões no primário (V_P) e secundário (V_S) depende fundamentalmente da relação entre o número de espiras no primário (N_P) e secundário (N_S).

Num transformador com primário de N_P espiras e secundário de $N_P/2$ espiras, a tensão no secundário será a metade da tensão no primário, ou seja $V_S = V_P/2$.

Verifica-se que o resultado da relação N_S/N_P é o mesmo da relação V_S/V_P. Logo, pode-se escrever :

$$\frac{V_S}{V_P} = \frac{N_S}{N_P} \qquad (1)$$

O resultado da relação (V_S/V_P) é denominado de relação da transformação.

***A relação de transformação expressa a relação entre a tensão induzida no secundário e a tensão aplicada ao primário*.**

Um transformador pode ser construído de forma a ter qualquer relação de transformação que se necessite. A **Tabela 1** mostra alguns exemplos.

Tabela 1 Algumas relações de transformação.

Relação de Transformação	**Tensões**
3	$V_S = 3 \times V_P$
5,2	$V_S = 5,2 \times V_P$
0,3	$V_S = 0,3 \times V_P$

TIPOS DE TRANSFORMADORES QUANTO À RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO

Quanto à relação de transformação, os transformadores podem ser classificados em três grupos:

- Transformador elevador.
- Transformador rebaixador.
- Transformador isolador.

TRANSFORMADOR ELEVADOR

Denomina-se transformador elevador todo o transformador com uma relação de transformação maior que 1 ($N_S > N_P$).

Devido ao fato de que o número de espiras do secundário é maior que do primário, a tensão do secundário será maior que a do primário.

A **Fig.11** mostra um exemplo de transformador elevador, com relação de transformação de 1,5.

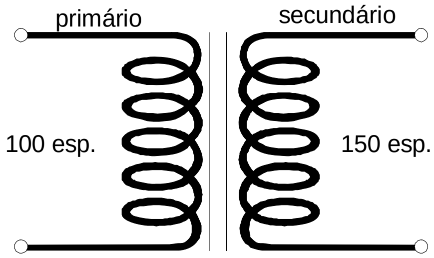


Fig.11 Transformador elevador de relação de transformação 1,5.

Se uma tensão de $100V_{CA}$ for aplicada ao primário, a tensão no secundário será de 150V.

TRANSFORMADOR REBAIXADOR

É todo o transformador com relação de transformação menor que 1 ($N_S<N_P$).

Nesse tipo de transformador, a tensão no secundário é menor que a no primário.

A **Fig**.**12** mostra um exemplo de transformador rebaixador, com relação de transformação de 0,2.

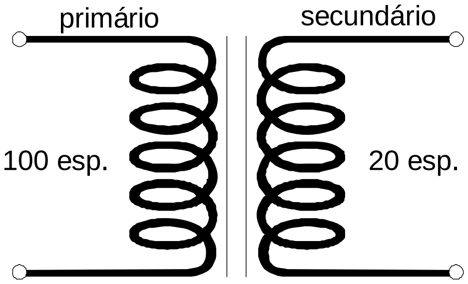


Fig.12 Transformador rebaixador de relação de transformação 0,2.

Nesse transformador, aplicando-se $50V_{CA}$ no primário, a tensão no secundário será 10V.

Os transformadores rebaixadores são os mais utilizados em eletrônica, para rebaixar a tensão das redes elétricas domiciliares (110V ou 220V para tensões de 6V, 12V e 15V necessárias à maioria dos equipamentos).

TRANSFORMADOR ISOLADOR

Denomina-se de isolador o transformador que tem uma relação de transformação igual 1 ($N_S = N_P$).

Como o número de espiras do primário é igual ao do secundário, a tensão no secundário é igual à tensão no primário.

A **Fig.13** mostra um exemplo de transformador isolador.

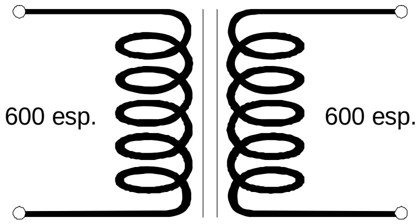


Fig.13 Transformador isolador.

Esse tipo de transformador é utilizado para isolar eletricamente um aparelho da rede elétrica.

Os transformadores isoladores são muito utilizados em laboratórios de eletrônica para que a tensão presente nas bancadas seja eletricamente isolada da rede.

Relação de potência nos transformadores

O transformador é um dispositivo que permite modificar os valores de tensão e corrente em um circuito de CA.

Em realidade, o transformador recebe uma quantidade de energia elétrica no primário, transforma em campo magnético e converte novamente em energia elétrica disponível no secundário, como pode ser visto na **Fig.14**.

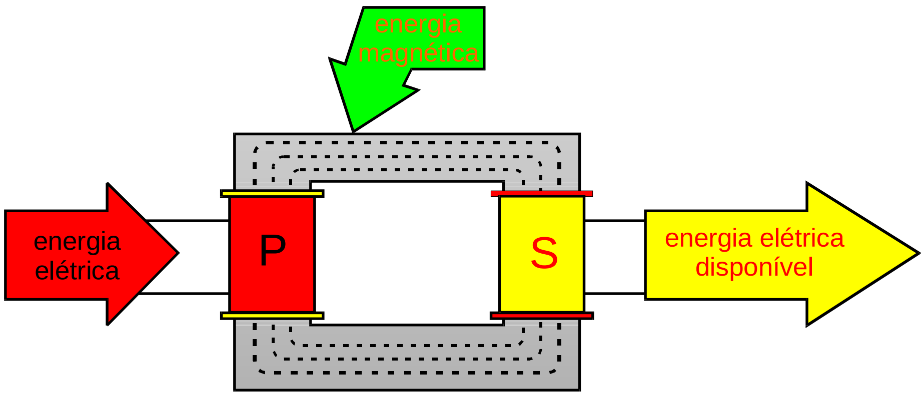


Fig.14 Conversão de energia elétrica do primário para o secundário.

A quantidade de energia absorvida da rede elétrica pelo primário do transformador é denominada de potência do primário, representada pela notação P_P.

Admitindo-se que não existam perdas por aquecimento do núcleo, pode-se concluir que toda a energia absorvida no primário está disponível no secundário.

A energia disponível no secundário é denominada de potência do secundário P_S. Se não existem perdas, pode-se afirmar que:

$$P_P = P_S \quad (2)$$

A potência do primário depende da tensão aplicada e da corrente absorvida da rede :

$$P_P = V_P \times I_P \qquad (3)$$

A potência do secundário é produto da tensão pela corrente no secundário:

$$P_S = V_S \times I_S \qquad (4)$$

Considerando o transformador como ideal, pode-se, então escrever:

$$V_S \times I_S = V_P \times I_P \qquad (5)$$

A seguir estão colocados dois exemplos de aplicação da equação.

Exemplo 1:

Um transformador rebaixador de 110V para 6V deverá alimentar o seu secundário uma carga que absorve uma corrente de 4,5A. Qual será a corrente no primário?

Solução:

$V_P = 110V$; $V_S = 6V$; $I_S = 4,5A$; $I_P = ?$

$$V_P \times I_P = V_S \times I_S \quad ; \quad I_P = \frac{V_S \times I_S}{V_P} = \frac{6 \times 4,5}{110} \quad ; \quad I_P = 0,245A$$

Exemplo 2:

Um transformador elevador de 110V para 600V absorve, no primário, uma corrente de 0,5A. Que corrente está sendo solicitada no secundário?

Solução:

$V_P = 110V$; $V_S = 600V$; $I_P = 0,5A$; $I_S = ?$

$$V_P \times I_P = V_S \times I_S \quad ; \quad I_S = \frac{V_P \times I_P}{V_S} = \frac{110 \times 0,5}{600} \quad ; \quad I_S = 91,67mA$$

POTÊNCIA EM TRANSFORMADORES COM MAIS DE UM SECUNDÁRIO

Quando um transformador tem apenas um secundário, a potência absorvida pelo primário é a mesma fornecida no secundário (considerando que não existe perdas por aquecimento).

Quando existe mais de um secundário, a potência absorvida da rede pelo primário é a soma das potências fornecidas a todos os secundários.

A potência absorvida da rede pelo primário é a soma das potências de todos os secundários.

Matematicamente, pode-se escrever:

$$P_P = P_{S1} + P_{S2} + \ldots. + P_{SN} \quad (6)$$

onde

P_P é a potência absorvida pelo primário;

P_{S1} a potência fornecida pelo secundário 1;

P_{S2} a potência fornecida pelo secundário 2;

P_{SN} a potência fornecida pelo secundário N.

Essa equação pode ser reescrita usando os valores de tensão e corrente no transformador.

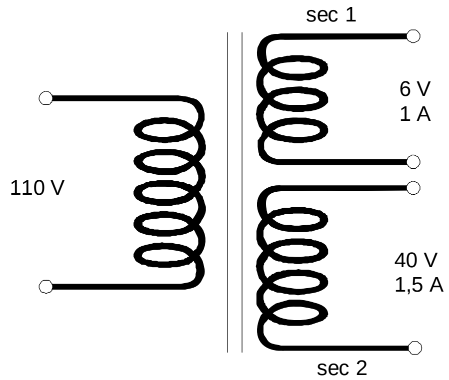
$$V_P \times I_P = (V_{S1} \times I_{S1}) + (V_{S2} \times I_{S2}) + \ldots..+ (V_{SN} \times I_{SN}) \quad (7)$$

A seguir está apresentado um exemplo de utilização dessa equação.

Exemplo 3:

Determinar a corrente no primário do transformador da figura abaixo.

Solução:



$$V_P \times I_P = (V_{S1} \times I_{S1}) + (V_{S2} \times I_{S2})$$

$$110 \times I_P = (6 \times 1) + (40 \times 1,5)$$

$$I_p = \frac{66}{110} \quad ; \quad I_p = 0,6A$$

Ligação de transformadores em 110V e 220V

Os aparelhos eletrônicos modernos são fabricados de forma a possibilitar a sua utilização tanto em redes de 110V como 220V.

A seleção normalmente é feita através de um botão que se encontra na parte posterior do aparelho.

Essa chave, na maioria dos casos, está ligada ao primário de um transformador.

De acordo com a posição da chave, o primário é preparado para receber 110V ou 220V da rede elétrica domiciliar, entregando os mesmos valores de tensão ao secundário.

Existem dois tipos de transformador, cujo primário pode ser ligado para 110V ou 220V:

- Transformador 110/220V com primário a 3 fios.
- Transformador 110/220V com primário a 4 fios.

TRANSFORMADOR PARA ENTRADA EM 110/220V COM PRIMÁRIO A TRÊS FIOS

O primário de um transformador 110/220V a três fios se constitui de uma bobina para 220V com uma derivação central, como ilustrado na **Fig.15**.

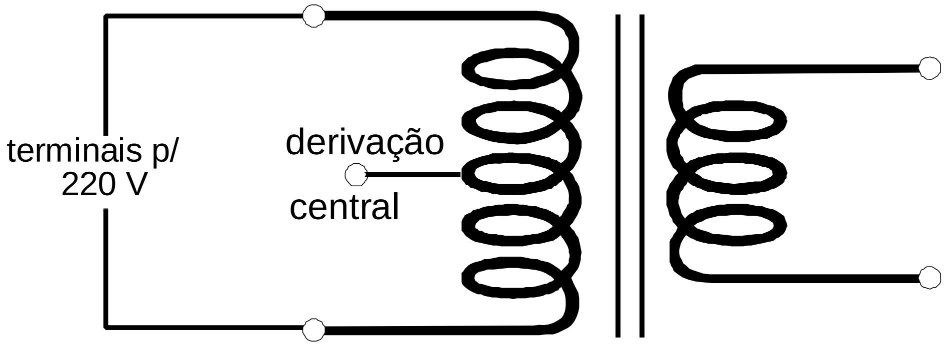


Fig.15 Transformador com primário a três fios.

A derivação central permite que se utilize apenas uma das metades do primário, aplicando 110V entre um dos extremos e a derivação central.

A **Fig.16** mostra a ligação desse tipo de transformadores para seleção de 110/220V através de uma chave.

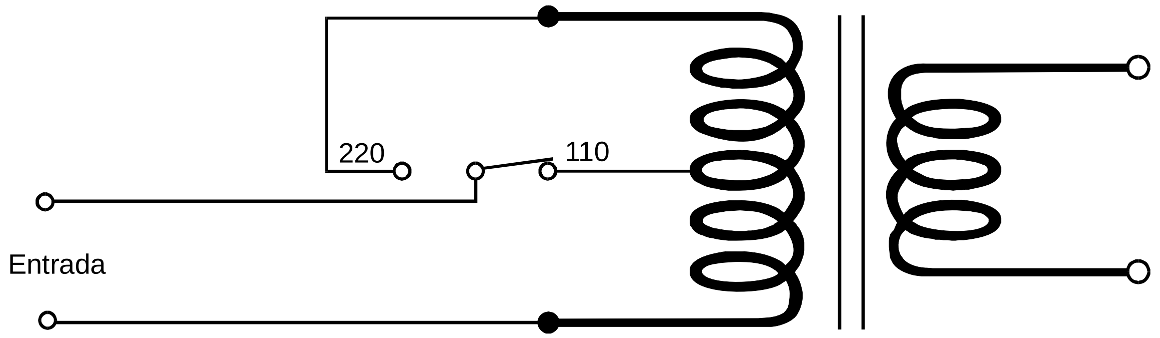


Fig.16 Seleção de 110 para 220V.

A chave utilizada para seleção 110/220V é normalmente de dois pólos, duas posições e deslizante, também conhecida como HH. A **Fig.17** mostra o aspecto real e o símbolo da chave.

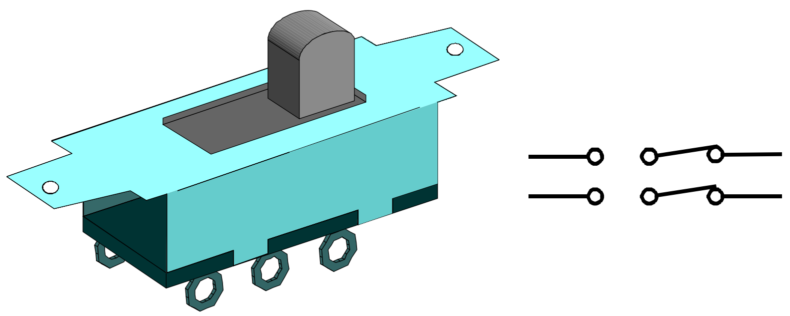


Fig.17 Chave HH e seu símbolo.

Nesse tipo de chave, cada um dos terminais centrais é ligado a um dos extremos ou ao outro, como mostrado na **Fig.18**.

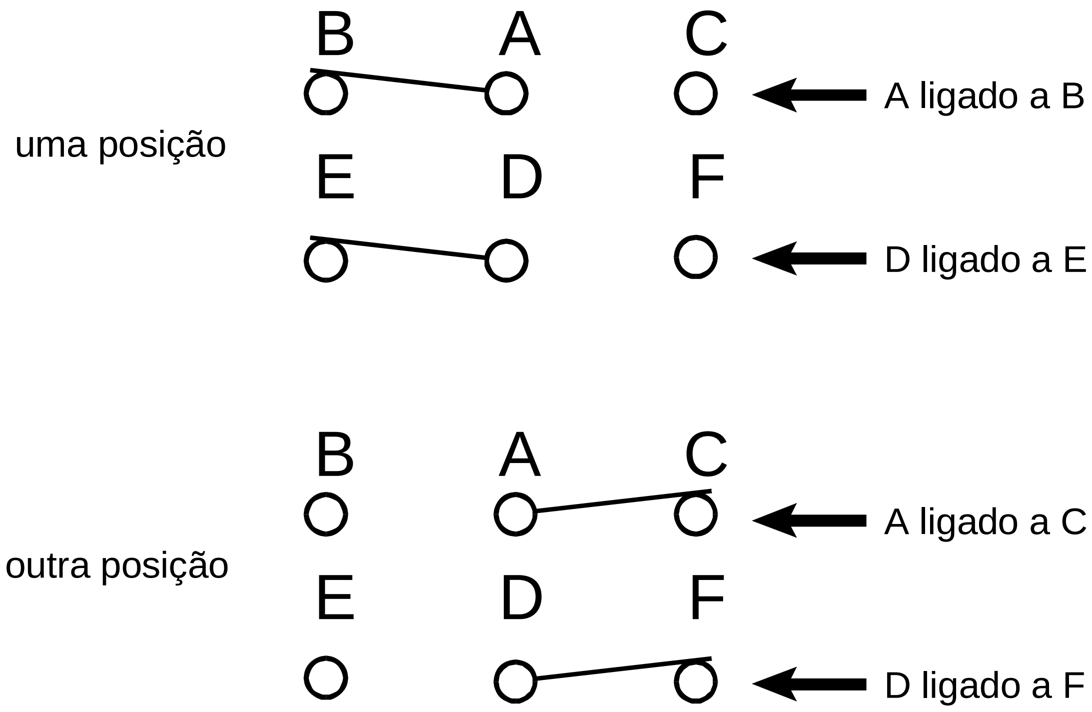


Fig.18 Posições das chaves HH.

Cada uma das seções (B A C e E D F) são independentes eletricamente.

Normalmente as duas seções da chave são utilizadas em paralelo, conforme mostra o esquema da **Fig.19** e a montagem real da **Fig.20**.

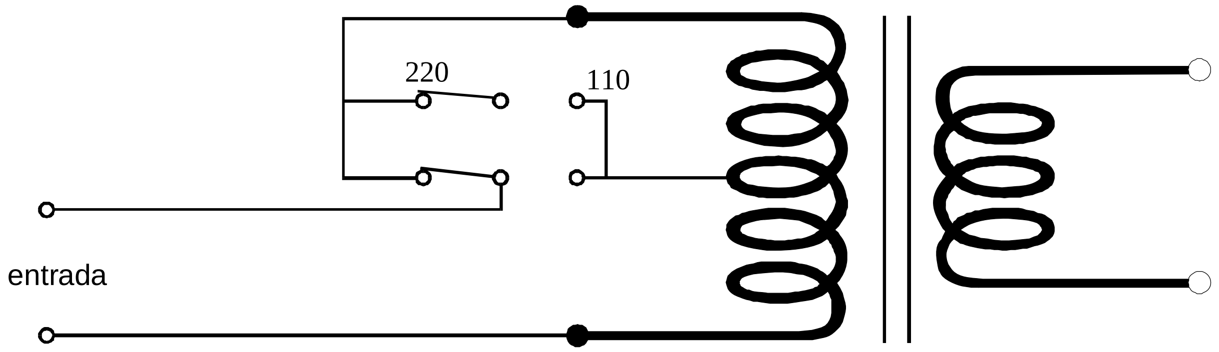


Fig.19 Esquema da seleção de 110 para 220V com a chave HH.

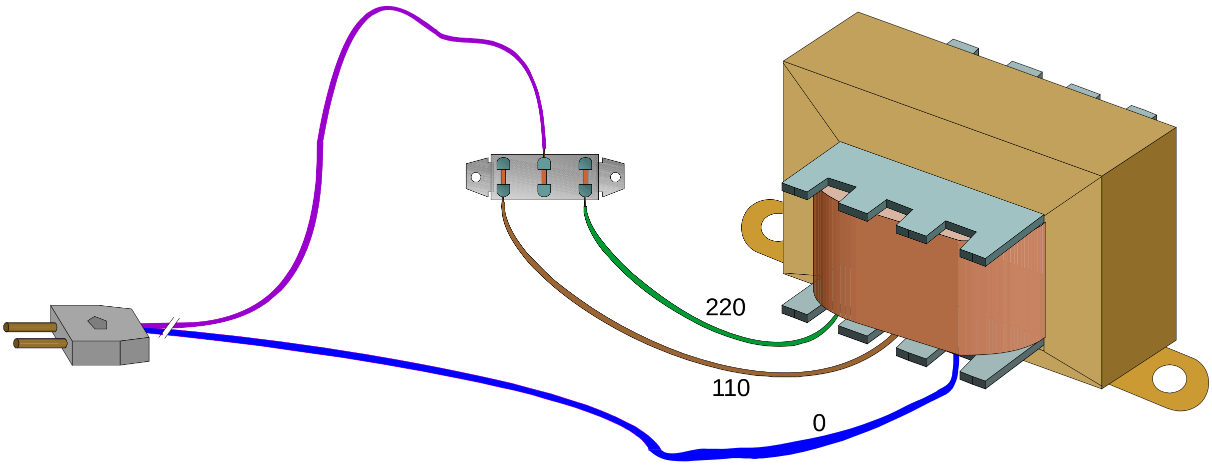


Fig.20 Montagem de um transformador 110/220 V om primário a três fios

TRANSFORMADOR PARA ENTRADA EM 110/220V COM PRIMÁRIO A QUATRO FIOS

O primário dos transformadores 110/220V a quatro fios é formado de duas bobinas para 110V eletricamente isoladas entre si, como ilustrado na **Fig.21**.

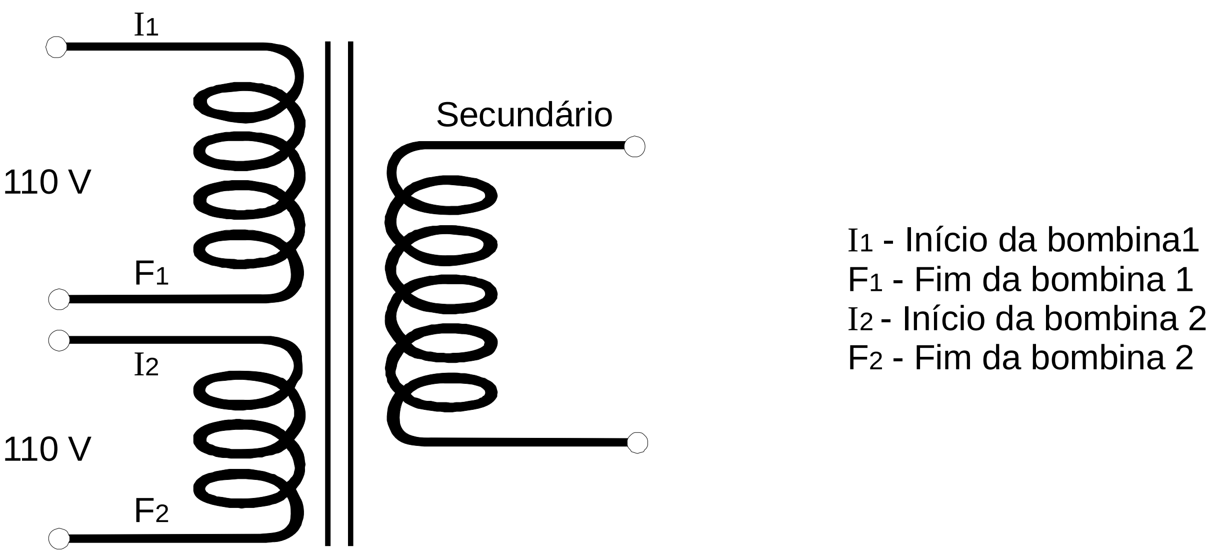


Fig.21 Transformador com primário a quatro fios.

Para ligação em 220V, as duas bobinas do primário devem ser ligadas em série, como pode ser visto na **Fig.22**.

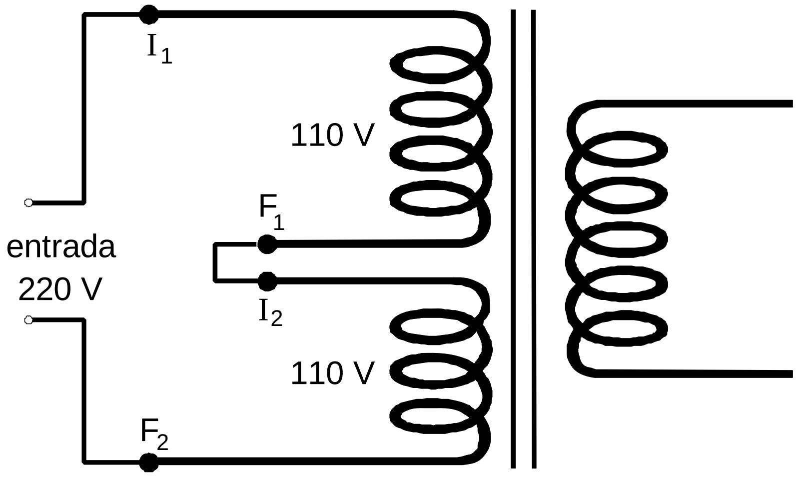


Fig.22 Ligação em 220V.

É importante observar que, nesta ligação, o fim da bobina primária superior está ligado com o início da bobina inferior. Essa ordem não pode ser modificada.

***Em um transformador para entrada 110/220V com primário a 4 fios, a ligação para 220V é feita colocando as bobinas do primário em série, observando a identificação dos fios*.**

Para a ligação em 110V, as duas bobinas do primário têm que ser ligadas em paralelo. A **Fig.23** mostra a ligação para 110V.

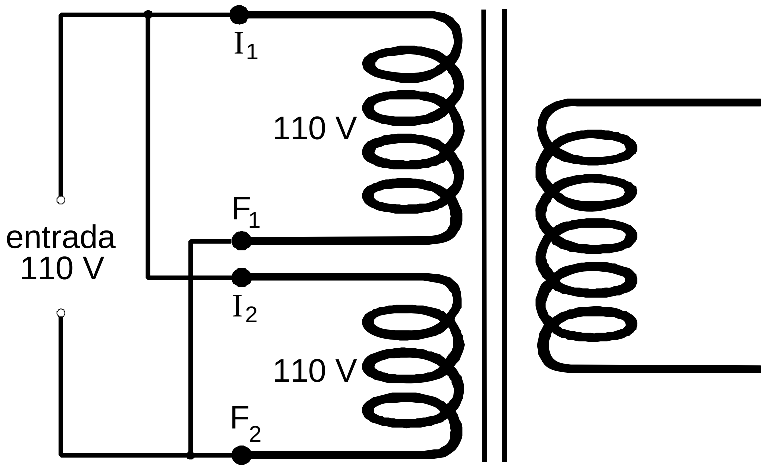


Fig.23 Ligação para 110V.

Também na ligação para 110V, a ordem de ligação dos fios é importante.

Conforme mostra a **Fig.23**, na ligação para 110V os inícios de bobinas são ligados juntos e os fins também.

Em um transformador para entrada 110/220V com primário a 4 fios, a ligação para 110V é feita colocando as duas bobinas primárias em paralelo, respeitando a identificação dos fios.

A troca de tensões 110/220V pode ser realizada através de uma chave HH, como mostrado na **Fig.24**. Na posição 110V os terminais I_1 e I_2 ficam em ponte através da chave e conectados a rede. Os terminais I_2 e F_2 também.

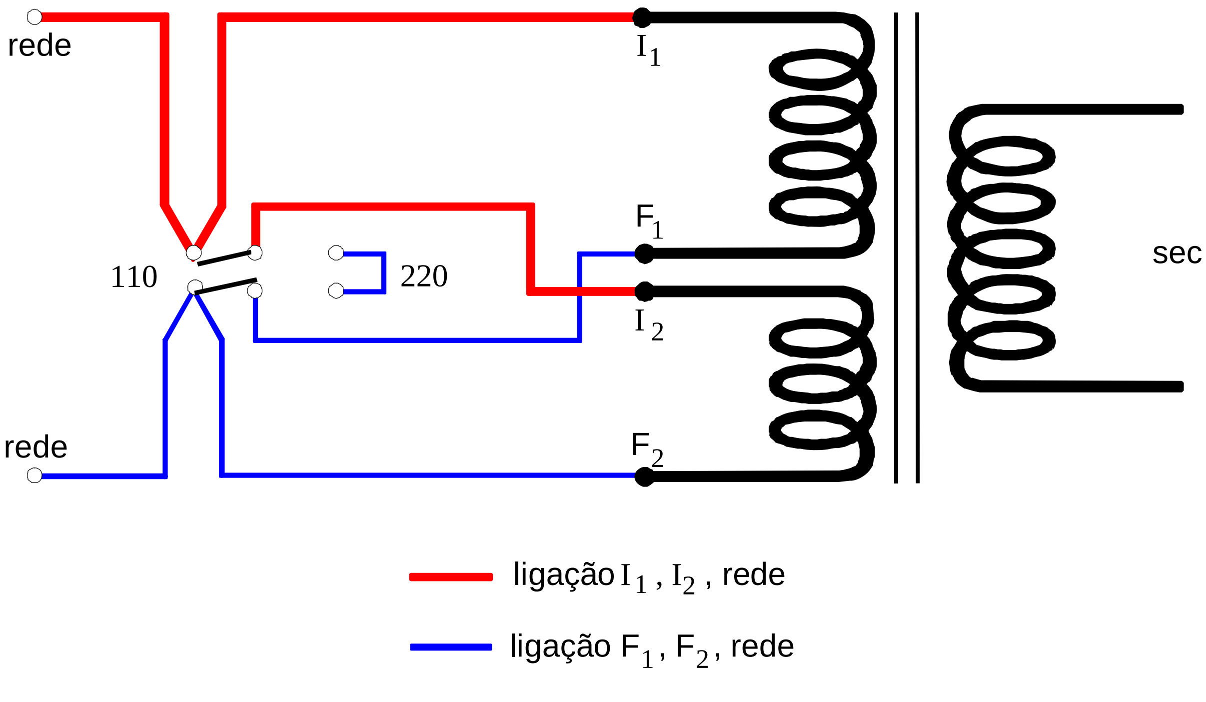


Fig.24 Chave HH na posição 110V.

Na posição 220V, I_1 e F_2 ficam direto à rede e F_1 e I_2 ligados em ponte, como ilustrado na **Fig.25**.

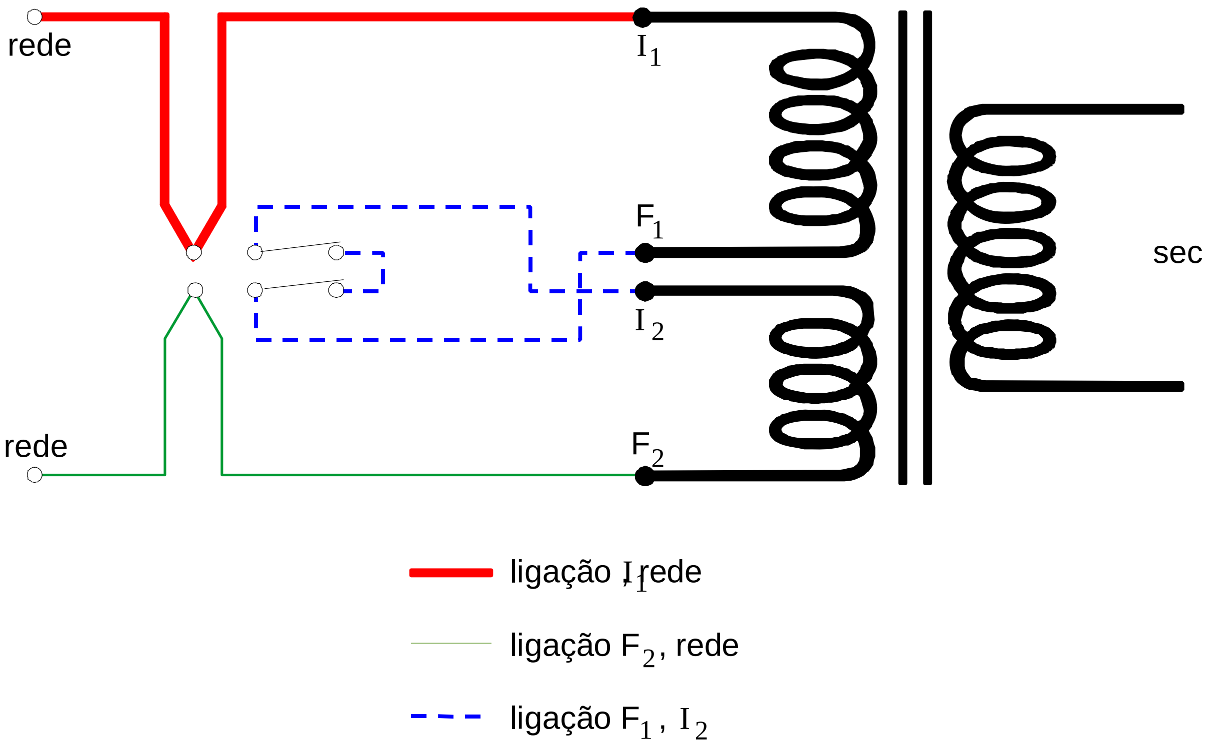


Fig.25 Chave HH na posição 220V.

A **Fig.26** mostra o aspecto real da ligação.

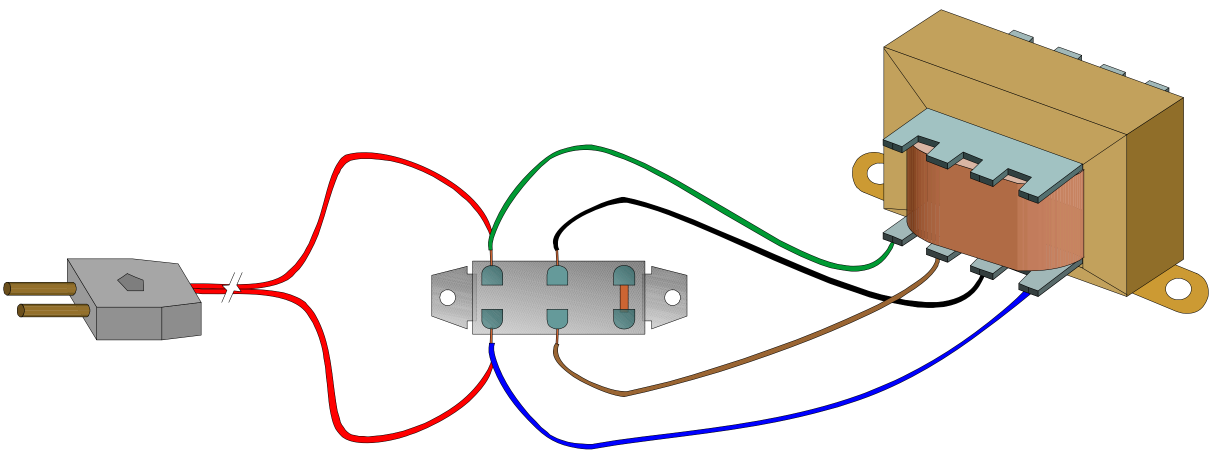


Fig.26 Ligação do transformador com primário a quatro fios.

INSTALAÇÃO DE FUSÍVEL E CHAVE LIGA/DESLIGA

Em todo o equipamento elétrico ou eletrônico é necessário dispor de dispositivos de comando tipo liga/desliga e de dispositivos de proteção que evitem danos maiores em caso de situações anormais.

Tanto os dispositivos de controle como os de proteção, normalmente são instalados na entrada de energia do circuito, antes do transformador.

Para a proteção do equipamento normalmente se utiliza um fusível, cuja função é romper-se caso a corrente absorvida da rede se eleve, devido alguma anormalidade.

Normalmente o fusível também é colocado antes do transformador. A **Fig.27** mostra as posições da chave liga/desliga e do fusível de proteção.

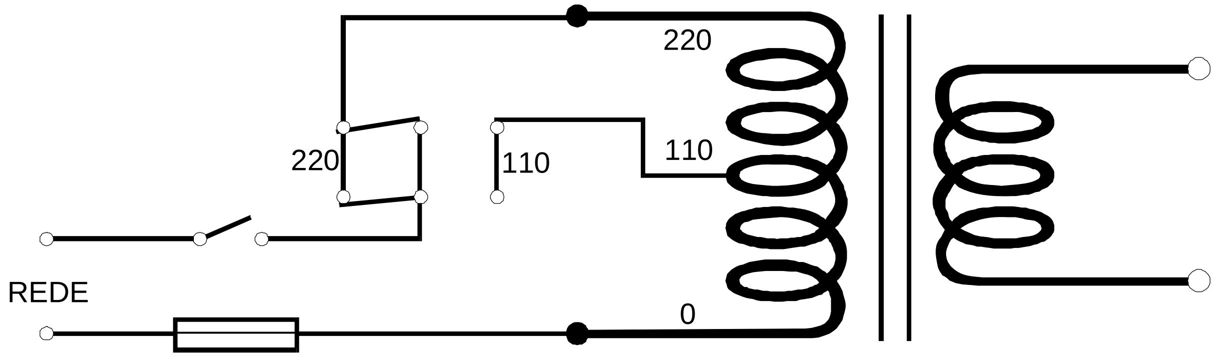


Fig.27 Chave liga/desliga e fusível de proteção.

O fusível é dimensionado para um valor de corrente um pouco superior a corrente necessária para o primário do transformador. Havendo uma sobrecarga, o fusível se rompe, cortando a entrada de energia do transformador.

Alguns equipamentos tem mais de um fusível, colocando um fusível geral antes do transformador e outros após, de acordo com a necessidade.

A **Fig.28** mostra o aspecto real de um circuito de entrada de energia de um aparelho eletrônico.

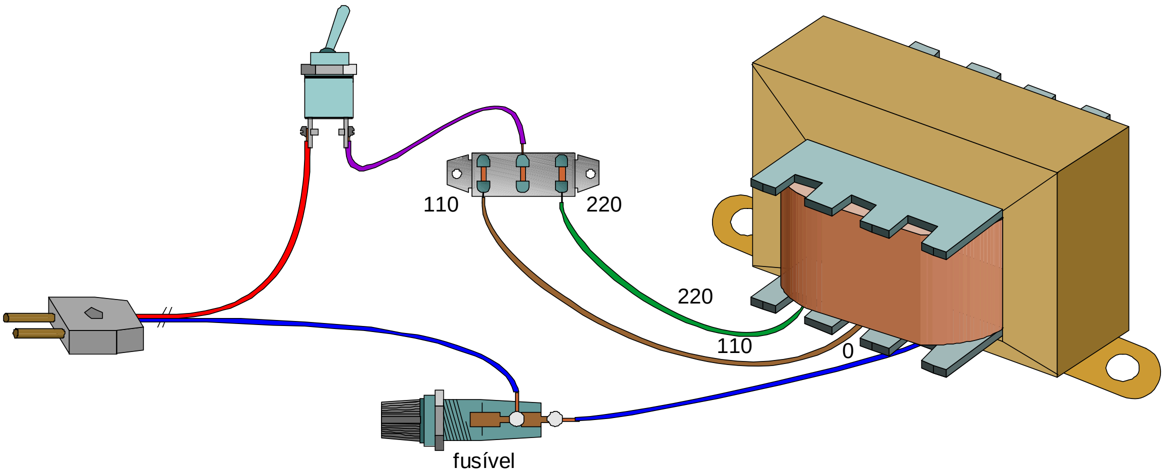
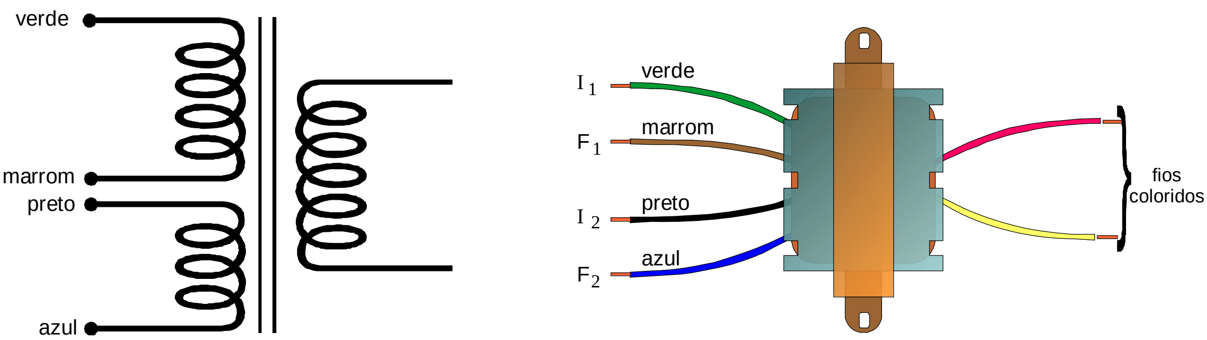


Fig.28 Circuito de entrada típico.

Identificação dos terminais das bobinas do primário

Observa-se que tanto na ligação para 110V como para 220V, a ordem de início e fim das bobinas é importante. Normalmente os quatro fios do primário são coloridos e o esquema indica os fios, como ilustrado na **Fig.29**.



I_1 - Início da bobina 1

F_1 - Fim da bobina 1

I_2 - Início da bobina 2

F_2 - Fim da bobina 2

Fig.29 Identificação dos terminais do transformador.

A **Fig.30** mostra como seriam realizadas as ligações para 110 e 220V usando o transformador apresentado como exemplo.

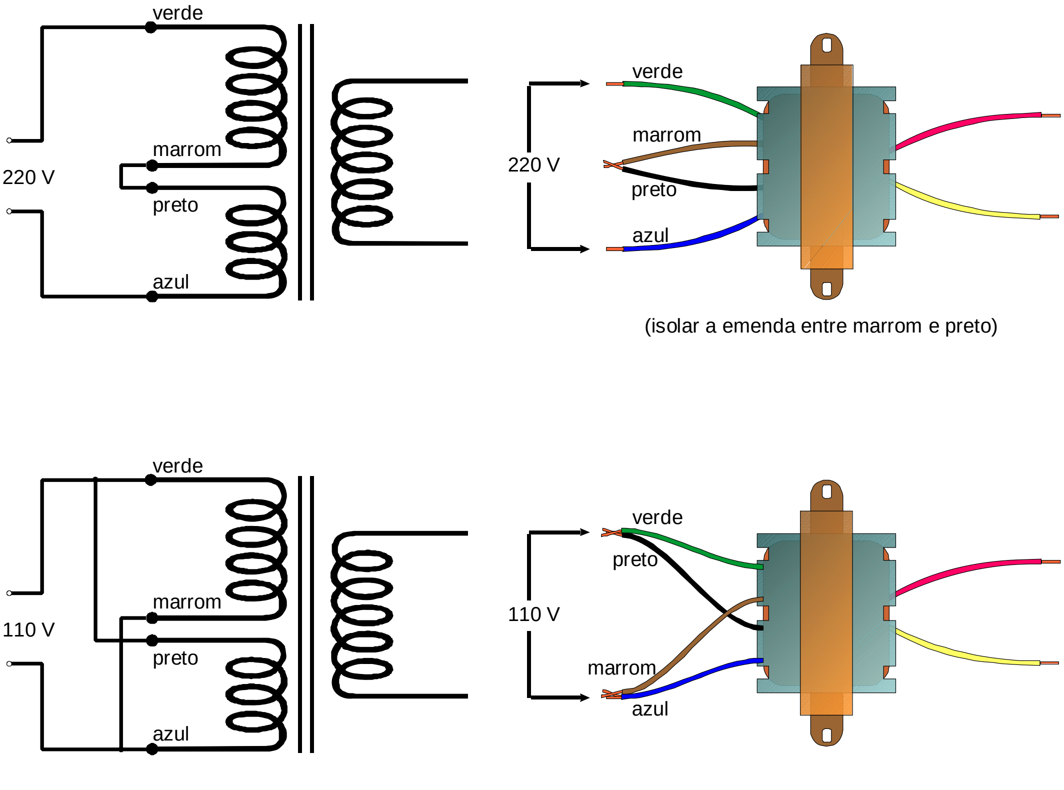


Fig.30 Ligações para 110 e 220V.

Quando não se dispõe do esquema do transformador com as cores dos fios, é necessário realizar um procedimento para identificá-los, uma vez que caso a ligação seja realizada incorretamente, o primário do transformador será danificado irreversivelmente. O procedimento é o seguinte:

- Identificar com o ohmímetro o par de fios que corresponde a cada bobina.

Sempre que o ohmímetro indicar continuidade, os dois fios medidos são da mesma bobina, como pode ser visto na **Fig.31**.

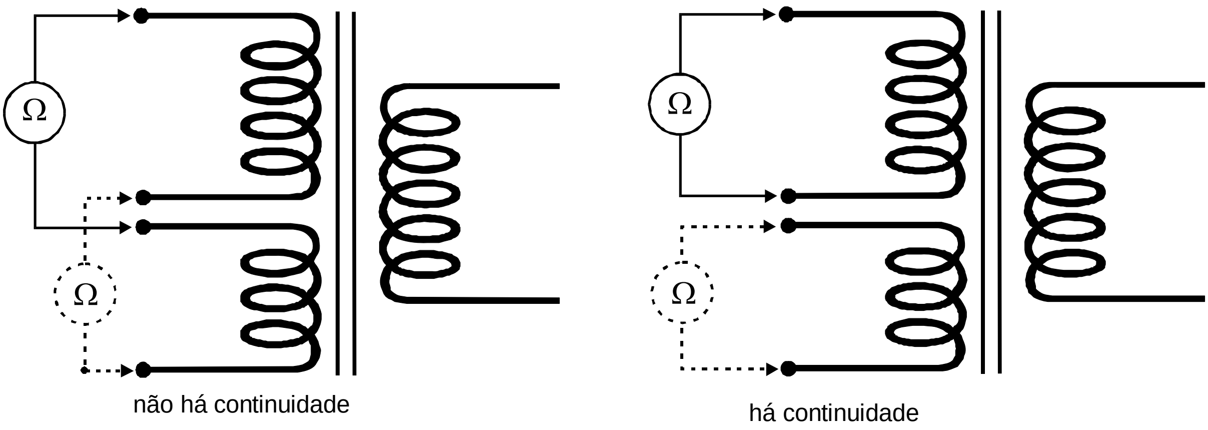


Fig.31 Identificação dos fios de cada bobina.

Esse procedimento, além de determinar os fios de cada bobina permite testar se as bobinas do transformador estão em boas condições.

- Separar os pares de fio de cada bobina e identificar os fios de cada uma delas com início e fim (I_1, F_1 e I_2, F_2), como ilustrado na **Fig.32**.

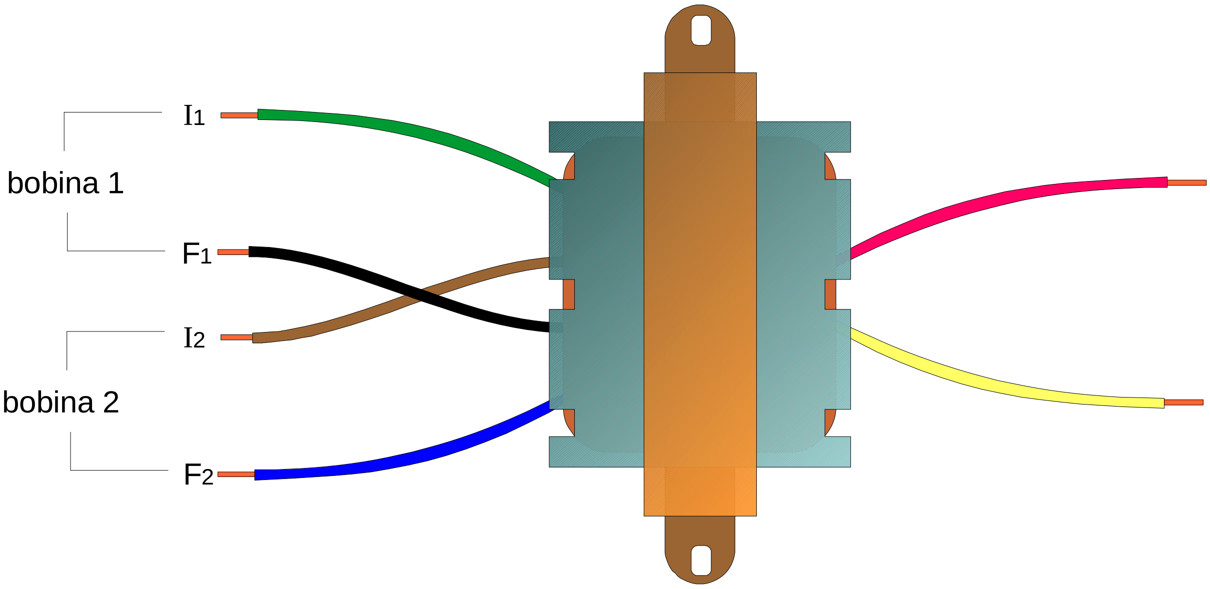


Fig.32 Separação e identificação dos fios das bobinas.

A identificação de início e fim pode ser feita aleatoriamente em cada bobina. Posteriormente, essa identificação será testada para verificar se está correta.

- Interligar as bobinas do primário em série.
- Aplicar no secundário uma tensão CA de valor igual a tensão nominal do secundário.

Por exemplo, em um transformador 110/220V para 6V (6VCA no secundário), deve-se aplicar a tensão de 6V no secundário.

No transformador usado como exemplo, aplicando 220V no primário, obtém-se 6V no secundário. Isto significa que, aplicando 6V no secundário, deve-se obter 220V no primário (em série).

Assim, pode-se verificar se a identificação dos fios está correta medindo-se a tensão nos extremos do primário.

Medindo-se 220V nos extremos do primário, a identificação está correta. Por outro lado, encontrando-se 0V, a identificação está errada.

Nesse caso, para corrigir a identificação, deve-se trocar apenas a identificação de uma das bobinas (I_1 por F_1 ou I_2 por F_2), como mostrado na **Fig.33**.

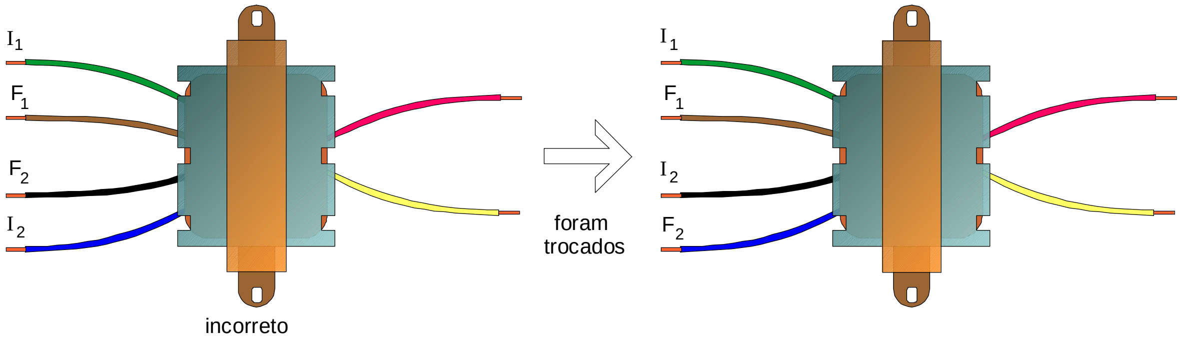


Fig.33 Correção da identificação de uma das bobinas.

É conveniente repetir o teste para verificar se os 220V são obtidos no primário.

ESPECIFICAÇÃO DE TRANSFORMADORES

A especificação técnica de um transformador deve fornecer:

- As tensões do primário.
- As tensões e correntes do secundário.

A especificação 110/220V, 6V-1A, 30V-0,5A representa um transformador com as seguintes características :

- Primário com entrada para 110V ou 220V.
- Dois secundários (um para 6V-1A e outro para 30V-0,5A).

Relação de fase entre as tensões do primário e do secundário

A tensão no secundário de um transformador é gerada quando o fluxo magnético variável do primário corta as espiras do secundário.

Como a tensão induzida é sempre oposta a tensão indutora, conclui-se que a tensão no secundário tem sentido contrário a do primário.

Isto significa que a tensão no secundário está defasada 180º da tensão no primário; ou seja, quando a tensão no primário aumenta num sentido, a tensão do secundário aumenta no sentido oposto, como ilustrado na **Fig.34**.

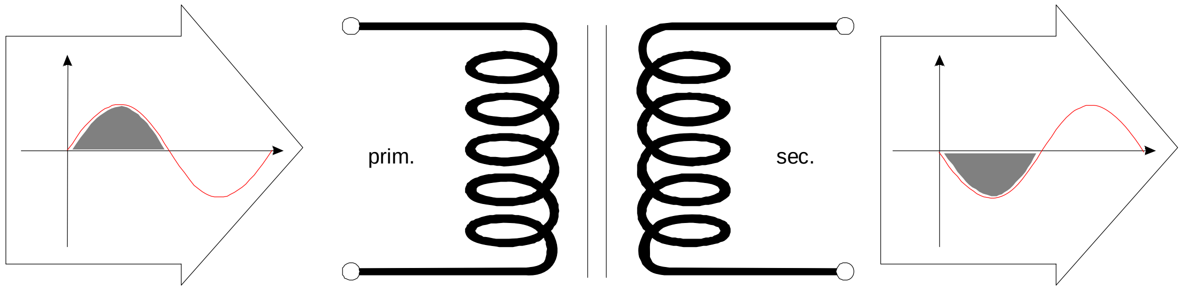


Fig.34 Defasagem da tensão do secundário em relação à do primário.

PONTO DE REFERÊNCIA

Para um transformador ligado em CA, observa-se que no secundário, a cada momento, um terminal é positivo e o outro é negativo. Após algum tempo, existe uma troca de polaridade: o terminal que era positivo torna-se negativo, e vice-versa, como pode ser visto na **Fig.35**.

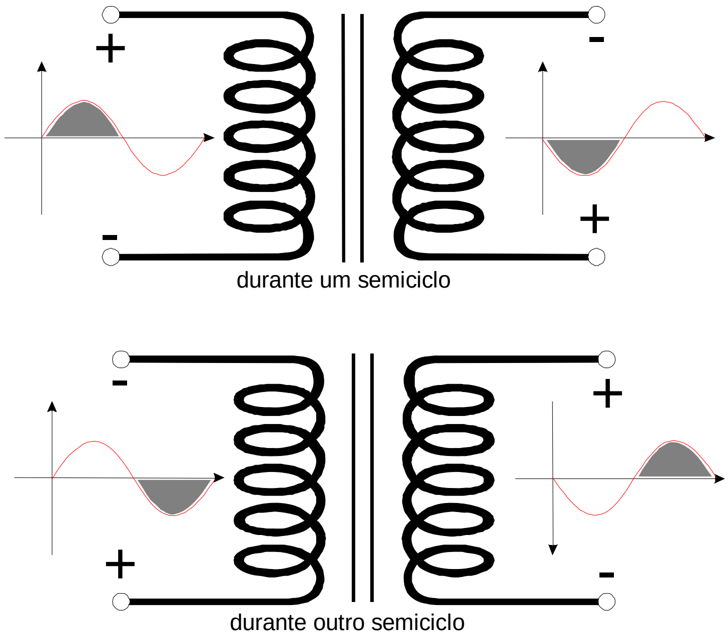


Fig.35 Inversão da polaridade no secundário.

Nos equipamentos eletrônicos é comum um dos terminais dos transformadores ser utilizado como referência, sendo ligado ao terra do circuito.

Nesse caso, o potencial do terminal **aterrado** é considerado como sendo 0V, não apresentando polaridade.

Isso não significa que não ocorra a troca de polaridade no secundário do transformador.

Em um semiciclo da rede, o terminal livre é positivo com relação ao terminal de referência que está aterrado.

No outro semiciclo da rede, no entanto, o terminal livre é negativo com relação ao potencial de referência, como pode ser visto na **Fig.36**.

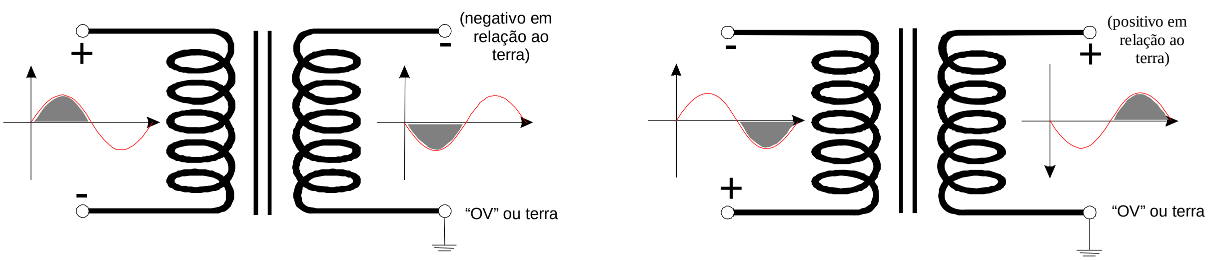


Fig.36 Polaridade do terminal livre com respeito ao terra.

TRANSFORMADOR COM DERIVAÇÃO CENTRAL NO SECUNDÁRIO

Os transformadores com derivação central no secundário (Center Tap) encontram ampla utilização em eletrônica. Na maioria dos casos, o terminal central é utilizado como referência, sendo ligado ao terra do circuito eletrônico, como ilustrado na **Fig.37**.

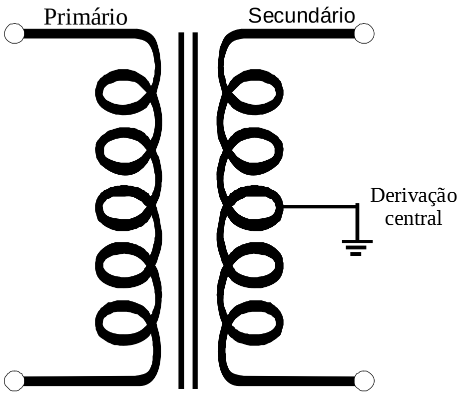


Fig.37 Transformador com derivação central aterrada.

Durante o funcionamento desse tipo de transformador ocorre uma formação de polaridades bastante singular. Em um dos semiciclos da rede, um dos terminais livres do secundário tem potencial positivo com relação à referência, e o outro terminal tem potencial negativo. Observa-se que a inversão de fase (180º) entre primário e secundário cumpre-se perfeitamente.

No outro semiciclo, há uma troca entre as polaridades dos extremos livres do transformador, enquanto o terminal central permanece a 0V, como pode ser visto na **Fig.38**.

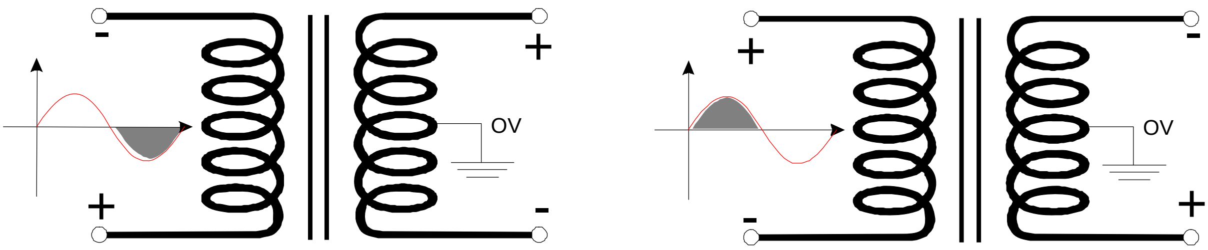


Fig.38 Terminal central sempre a 0V na troca entre polaridades

***Em um transformador em que o secundário disponha de uma derivação central, pode-se conseguir instantaneamente tensões negativas e positivas. Para isso, utiliza-se o terminal central como referência*.**

Isso pode ser observado usando-se um osciloscópio, como pode ser visto na **Fig.38**.

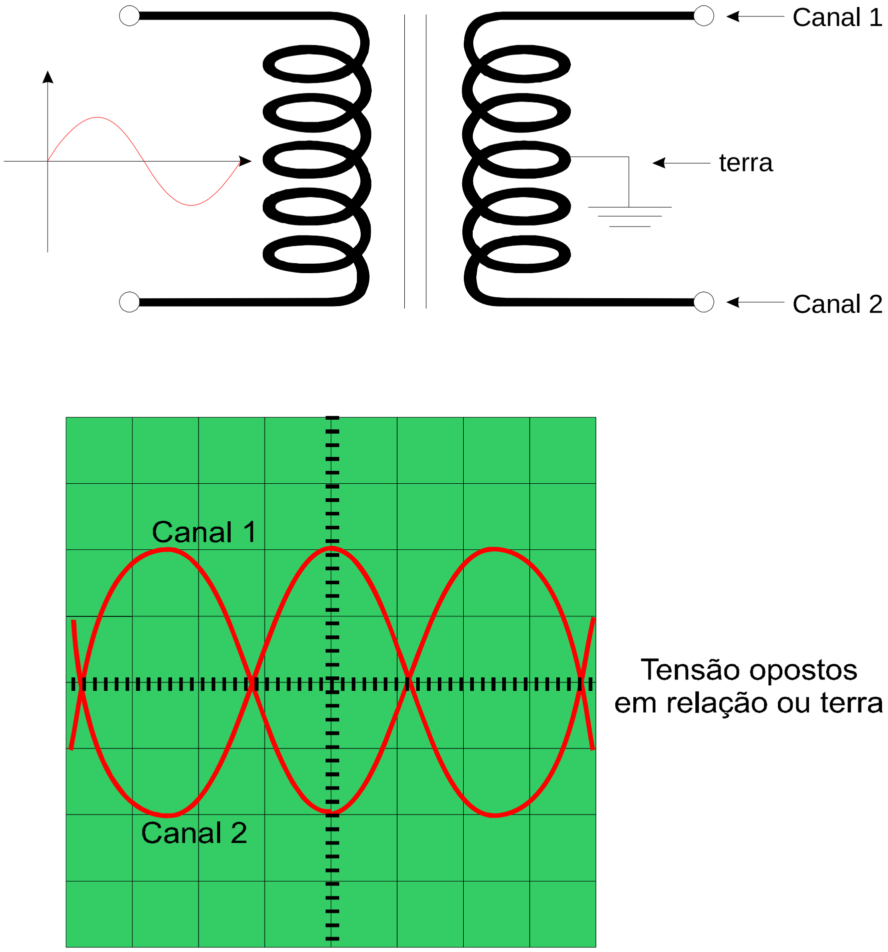


Fig.38 Defasagem entre as tensões no secundário de um transformador com derivação central.

A especificação técnica de um transformador em que o secundário tenha derivação central deve ser feita da seguinte forma: características do primário (por exemplo, 110/220V), indicação do secundário (por exemplo, 12V com 6V entre a derivação e cada extremo) e corrente no secundário (por exemplo, 1A).

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. O que se entende por primário e secundário de um transformador ?

2. Por que o núcleo de um transformador é laminado ?

3. Defina a expressão "relação de transformação".

4. Como é feita a ligação de um transformador de 110/220 V com primário a 4 fios ?

BIBLIOGRAFIA

MARTIGNONI, ALFONSO. **Transformadores.** 4.ª ed., Revista Porto Alegre, Globo, 1979, 307 p, il.

SENAI/DN. **Transformador monofásico.** Rio de Janeiro, Divisão de Ensino e Treinamento, 1980, (Módulo Instrucional - Eletricidade; eletrotécnica, 15).

VAN VALKENBURGH, NOOGER & NEVILLE. **Eletricidade Básica**. 5.ª ed., Rio de Janeiro, Freitas Bastos, 1960, vol.4 il.

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

O cliente é a razão do nosso trabalho, a fim de inseri-lo em um novo contexto social de competitividade e empregabilidade.

Introdução

A partir deste fascículo, que tratará das características e do comportamento do circuito RC série em CA, inicia-se o estudo de pequenas associações de componentes ligados a fontes de corrente alternada.

É um momento importante no seu estudo de eletrônica básica, visto que inicia-se a constituição de **circuitos mais complexos** envolvendo componentes que já são conhecidos.

Estude-o cuidadosamente, tendo como objetivo compreender o comportamento desses circuitos que são muito importantes em equipamentos tanto de caráter industrial como de lazer.

Para ter sucesso no desenvolvimento do conteúdo e atividades deste fascículo, o leito deverá ter conhecimentos relativos a:

- Resistores.
- Capacitores em corrente alternada.
- Representação fasorial de parâmetros elétricos.

O circuito RC série em corrente alternada

Os circuitos RC série em CA são utilizados como **redes de defasagem** quando se necessita obter uma defasagem entre a tensão de entrada e de saída. A **Fig.1** ilustra este princípio.

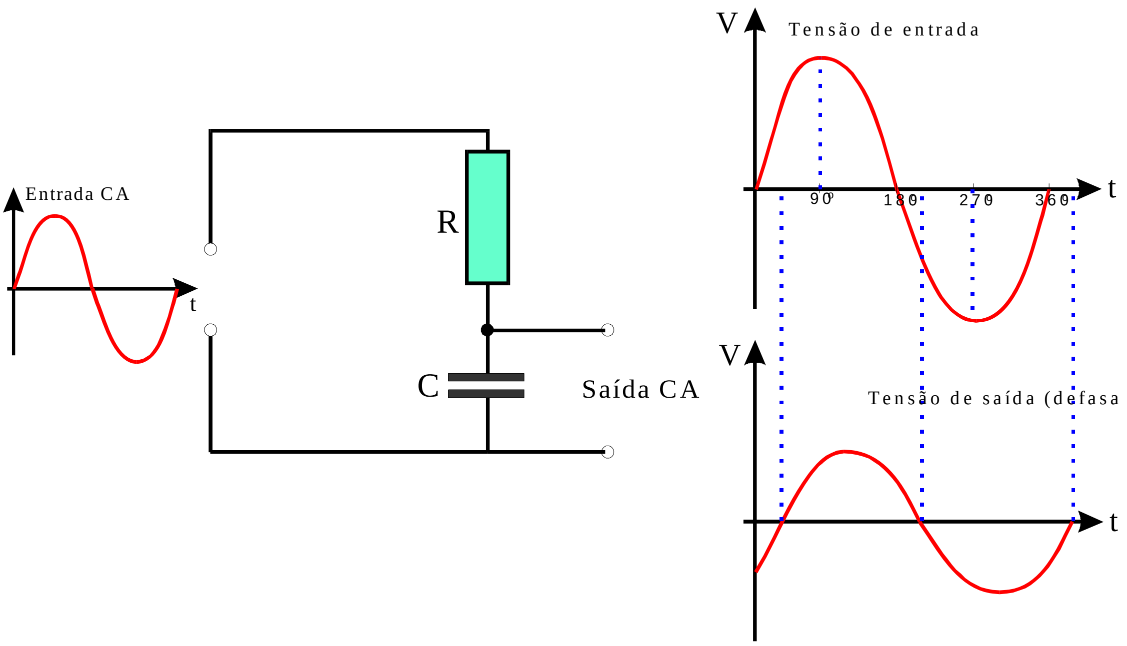


Fig.1 Circuito RC em CA.

Essas redes de defasagem são muito empregadas nos equipamentos industriais, como por exemplo, os controles de velocidade para motores.

A CORRENTE EM CIRCUITOS SÉRIE

A característica fundamental de um circuito série é que a corrente é única em todos os componentes associados. Essa característica se verifica tanto em circuitos alimentados por CC como por CA, como pode ser visto na **Fig.2**.

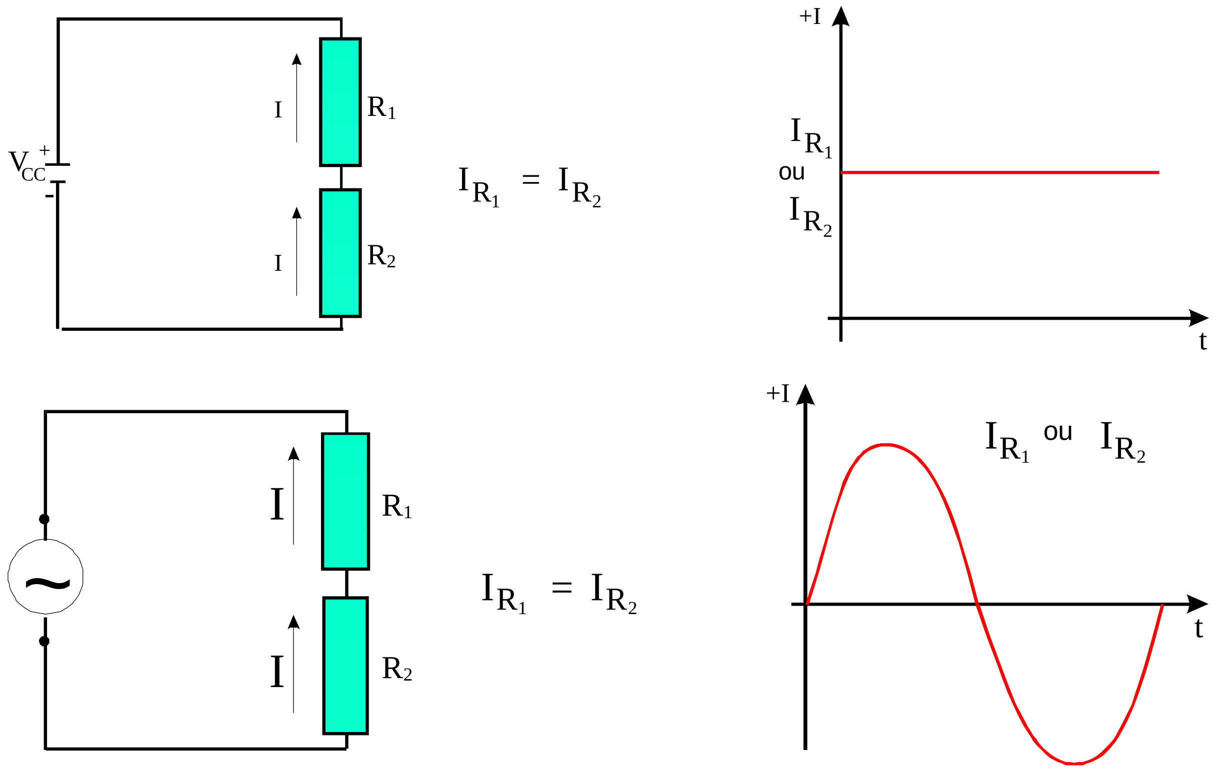


Fig.2 Corrente em circuitos série.

Quando se realiza o estudo de um circuito série em CA com o objetivo de traçar os gráficos senoidais das tensões sobre seus componentes, a corrente é tomada como ponto de referência por ser única em todos os componentes.

GRÁFICOS SENOIDAIS DO CIRCUITO RC SÉRIE

Quando um circuito série formado por um resistor e um capacitor é ligado a uma rede de CA senoidal, ocorre a circulação de corrente, como mostrado na **Fig.3**.

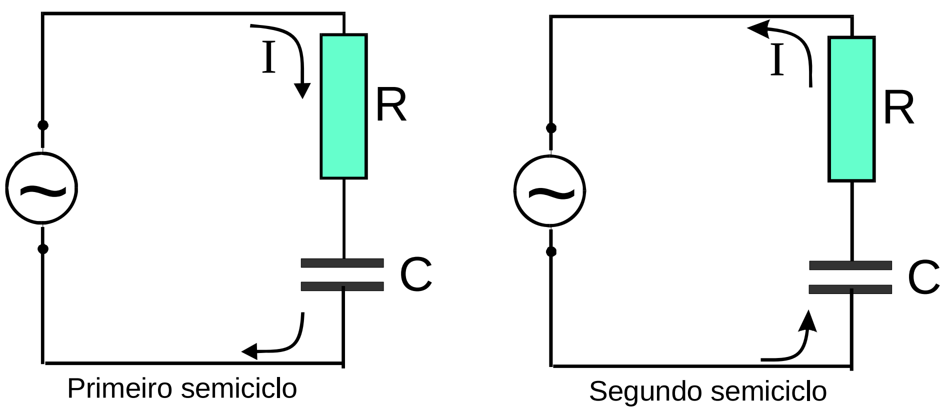


Fig.3 Circulação de corrente em um circuito CA.

A corrente circulante tem a forma senoidal, podendo ser representada através de um gráfico, como ilustrado na **Fig.4**.

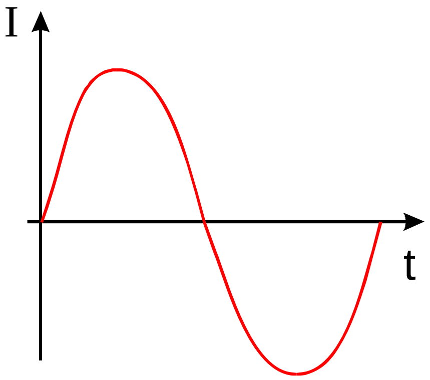


Fig.4 Corrente senoidal.

A circulação de corrente provoca o aparecimento de uma queda de tensão sobre o resistor. Como a corrente tem a forma senoidal, a queda de tensão sobre o resistor também é senoidal e está em fase com a corrente, como pode ser visto na **Fig.5**.

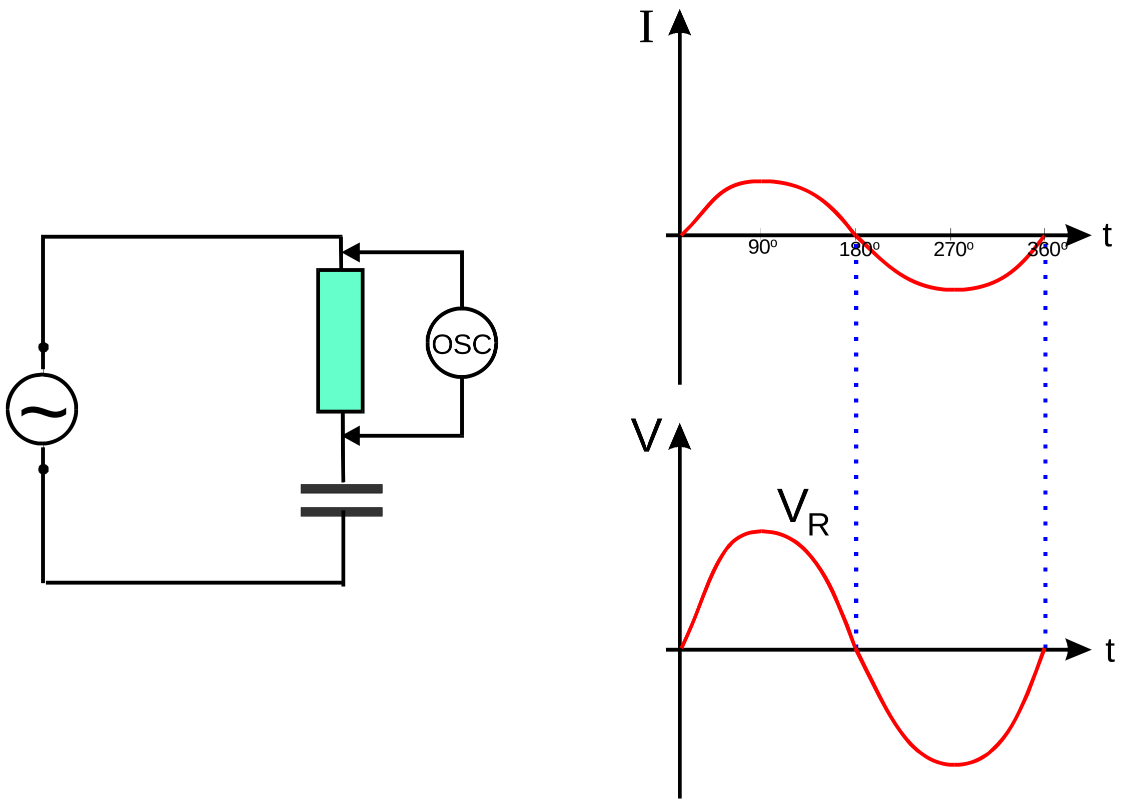


Fig.5 Tensão senoidal em fase com a corrente.

Sobrepondo os gráficos senoidais da corrente e da tensão no resistor nos mesmos eixos, observa-se facilmente este comportamento.

A tensão sobre o capacitor também tem a forma senoidal, como ilustrado na **Fig.6**.

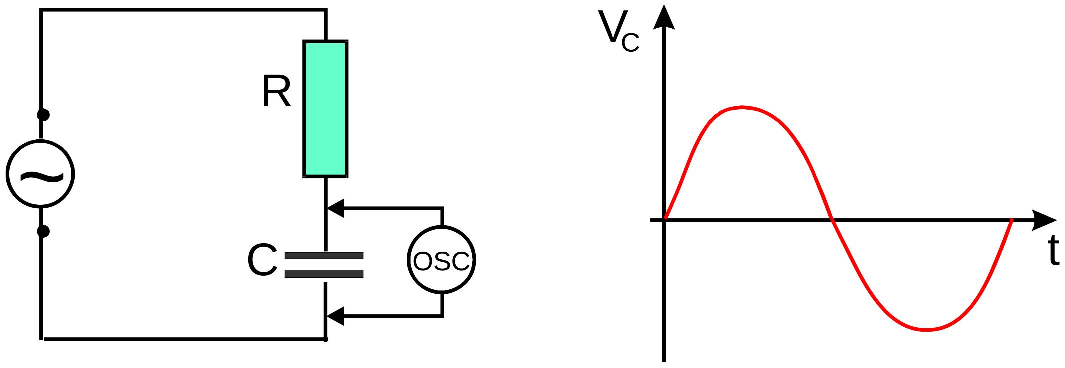


Fig.6 Tensão senoidal sobre o capacitor.

Existe, porém, um fato importante a considerar. A tensão sobre o capacitor está sempre atrasada de 90º com relação a sua corrente.

Por essa razão, a senóide que representa a tensão no capacitor deve ser deslocada 90º ao fazer a sobreposição dos gráficos do circuito, como pode ser visto na **Fig.7**.

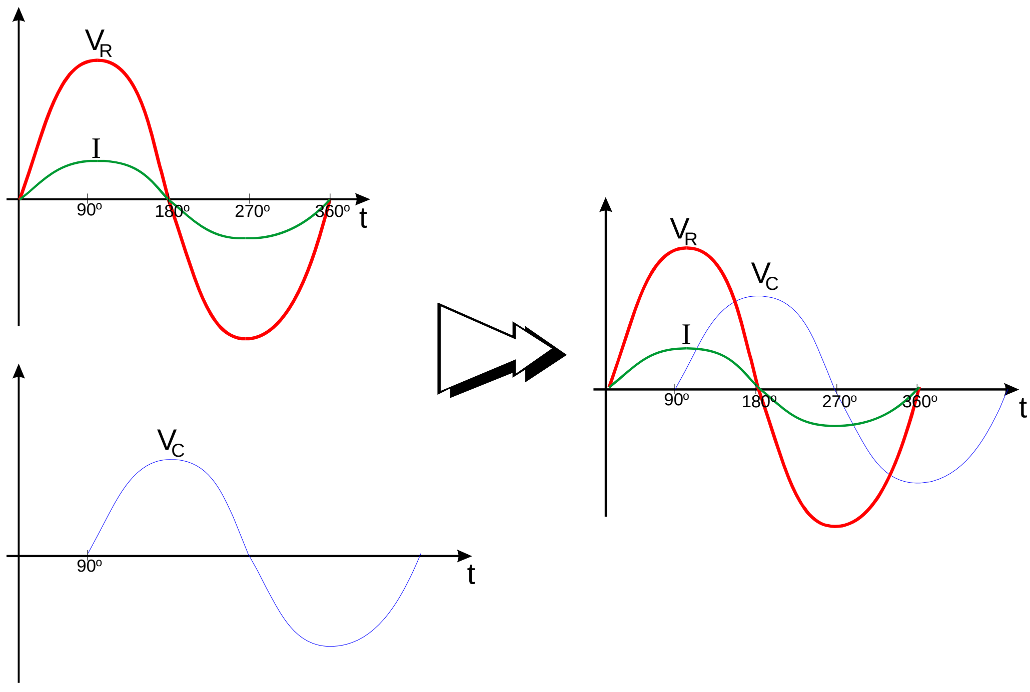


Fig.7 Defasagem de 90° da tensão sobre o capacitor.

O gráfico completo representa o comportamento das tensões e correntes no circuito RC série.

GRÁFICOS FASORIAIS DO CIRCUITO RC SÉRIE

Os gráficos senoidais, apesar de ilustrativos, não são apropriados para o desenvolvimento do cálculo dos parâmetros dos circuitos de CA. Por essa razão, o estudo dos circuitos em CA geralmente é feito através dos gráficos fasoriais.

Para elaborar o gráfico fasorial do circuito RC série, toma-se como ponto de partida o fasor da corrente porque seu valor é único no circuito. Normalmente o fasor I é colocado sobre o eixo horizontal do sistema de referência, como pode ser visto na **Fig.8.**

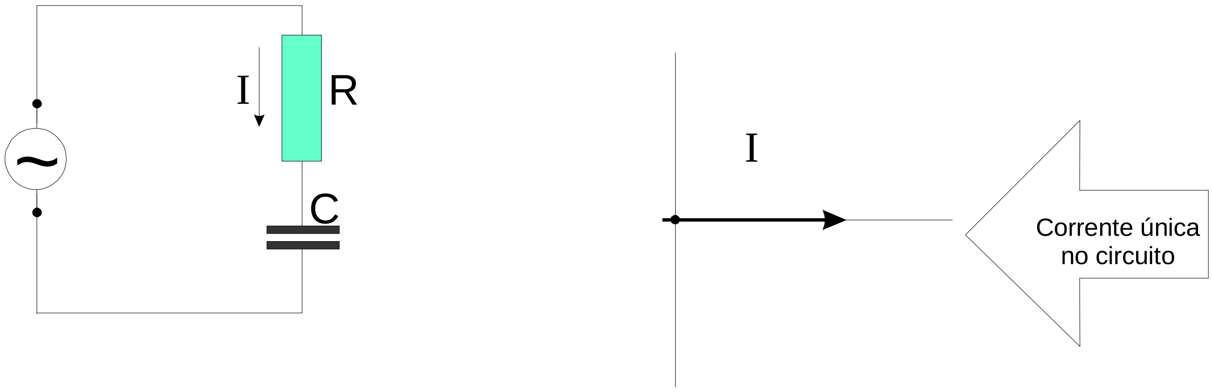


Fig.8 Fasor I do circuito RC.

Partindo-se do princípio de que a tensão sobre um resistor está sempre em fase com a corrente, pode-se representar o fasor V_R sobre o fasor I, como pode ser visto na **Fig.9.**

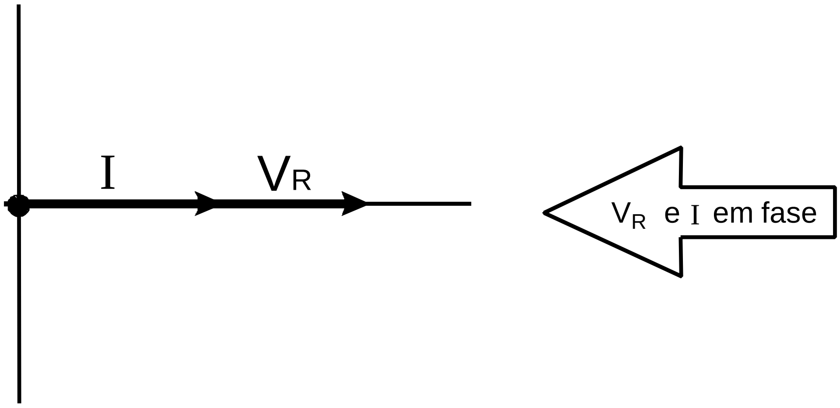


Fig.9 Fasor I e fasor V_R do circuito RC.

Falta ainda representar a tensão sobre o capacitor. Como a tensão no capacitor está atrasada 90º com relação a sua corrente, seu fasor forma um ângulo de 90º com o fasor I, como pode ser visto na **Fig.10**.

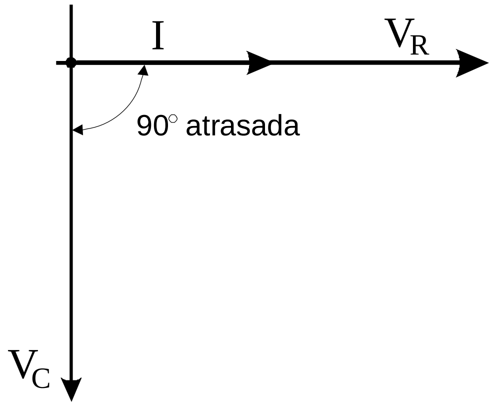


Fig.10 Representação fasorial da corrente, da tensão sobre o resistor e da tensão sobre o capacitor de um circuito RC série.

Impedância do circuito RC série

Quando se aplica a um circuito composto apenas por resistores uma fonte de CC ou CA, a oposição total que esse circuito apresenta à passagem da corrente é denominada de resistência total.

Entretanto, em circuitos de CA que apresentem resistências e reatâncias associadas, a expressão **resistência total** não é aplicada.

A oposição total que os circuitos compostos por resistências e reatâncias apresentam à passagem da corrente elétrica é denominada de **impedância**.

***Impedância é oposição total que um circuito composto por resistências e reatâncias apresenta ao fluxo da corrente elétrica*.**

A impedância é representada pela letra Z e é expressa em ohms.

O circuito RC série em CA é um exemplo típico de circuito que contém resistência e reatância. Por esta razão o circuito RC série tem uma **impedância** que se opõe à passagem da corrente alternada.

A impedância de um circuito não pode ser calculada da mesma forma que uma resistência total de um circuito composto apenas por resistores.

A existência de **componentes reativos**, que defasam correntes ou tensões, torna necessário o uso de formas particulares para o cálculo da impedância de cada tipo de circuito.

Tomando-se como exemplo o circuito RC série, a equação da impedância pode ser encontrada a partir da análise do gráfico fasorial das tensões mostrado na **Fig.11**.

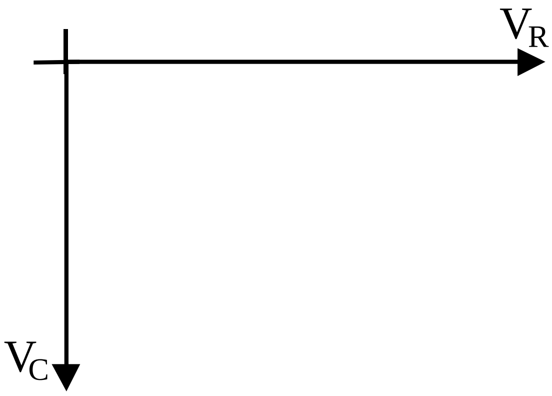


Fig.11 Gráfico fasorial das tensões.

Dividindo-se os fasores por um valor I (corrente), obtém-se:

$$X_C = V_C/I \quad (1)$$

$$R = V_R/I \quad (2)$$

Então, pode-se redesenhar o gráfico fasorial conforme mostra a **Fig.12**.

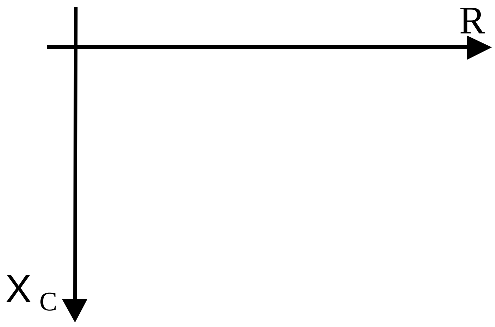


Fig.12 Diagrama fasorial de X_C e R.

O gráfico mostra que a resistência ôhmica do resistor e a reatância capacitiva do capacitor estão defasadas de 90º.

A impedância do circuito RC é a soma dos efeitos de X_C e R, ou seja, a soma entre o fasor X_C e R.

Graficamente, essa soma é a resultante do sistema de fasores X_C e R e pode ser matematicamente calculada pelo Teorema de Pitágoras, uma vez que os fasores R, X_C e Z formam um triângulo retângulo, como pode ser visto na **Fig.13**.

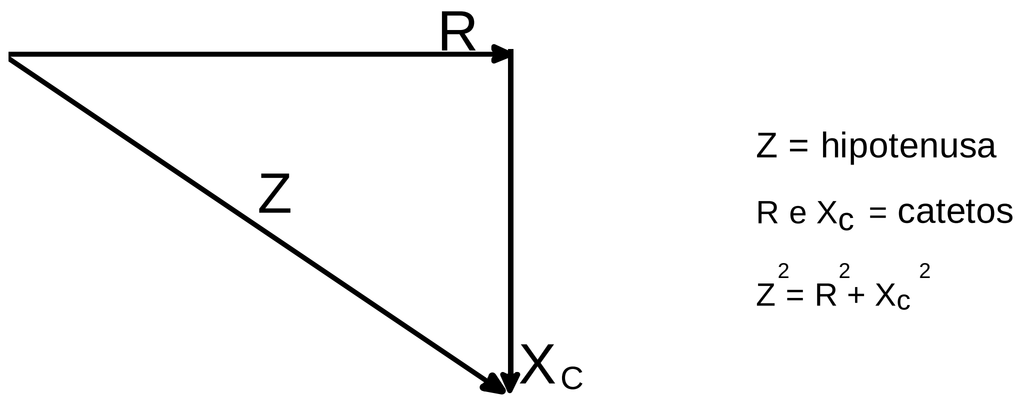


Fig.13 Determinação da resultante pelo teorema de Pitágoras.

Isolando o valor de Z, obtém-se a equação para o cálculo da impedância do circuito RC série.

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} \qquad (3)$$

onde

Z = impedância em Ω

R = resistência do resistor em Ω

X_C = reatância capacitiva em Ω.

Esta equação pode ser desenvolvida para isolar R ou X_C :

$$R = \sqrt{Z^2 - X_C^2} \qquad (4)$$

$$X_C = \sqrt{Z^2 - R^2} \qquad (5)$$

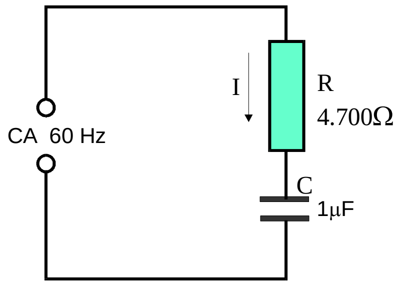
A seguir, são apresentados dois exemplos que ilustram a utilização da equação da impedância do circuito RC série.

Exemplo 1:

Dado o circuito da figura abaixo, determinar a impedância Z.

Dados:

$R = 4.700\Omega$
$C = 1\mu F$
$f = 60Hz$



Solução:

$$X_C = \frac{10^6}{2\pi \times f \times C} = \frac{1.000.000}{6,28 \times 60 \times 1}$$

$$X_c = 2.654\Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{4.700^2 + 2.654^2}$$

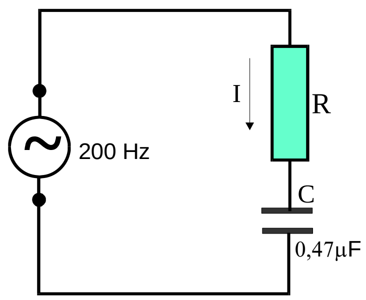
$$Z = 5.397\Omega$$

Exemplo 2:

Determinar o valor de R para que a impedância do circuito abaixo seja de 3800Ω.

Dados:

$C = 0,47\mu F$
$f = 200Hz$
$Z = 3.800\Omega$



Solução:

$$X_C = \frac{10^6}{2\pi \times f \times C} = \frac{1.000.000}{6,28 \times 200 \times 0,47}$$

$$X_c = 1.694\Omega$$

$$R = \sqrt{Z^2 - X_C^2} = \sqrt{3.800^2 - 1.694^2}$$

$$R = 3.402\Omega$$

A corrente no circuito RC série

A corrente em um circuito RC série aplicado a uma rede de CA depende da tensão aplicada e da impedância que o circuito apresenta.

Os valores de V, I e Z se relacionam segundo a Lei de Ohm, como ilustrado na **Fig.14**.

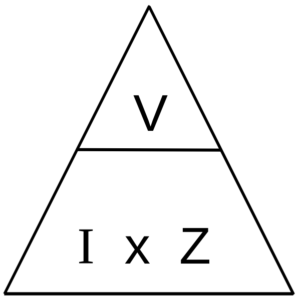


Fig.14 Lei de Ohm.

A seguir, estão apresentados dois exemplos que ilustram a aplicação da equação.

Exemplo 3:

Determinar a corrente no circuito da figura abaixo.

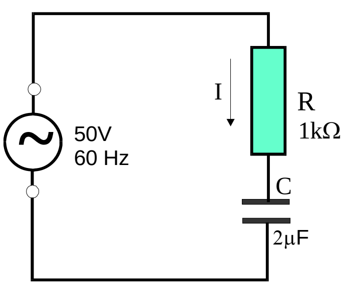
Dados:

$R = 1.000\Omega$

$C = 2\mu F$

$f = 60Hz$

$V_{CA} = 50V$



Solução:

Primeiro, calcula-se a impedância Z :

$$X_C = \frac{10^6}{2\pi \times f \times C} = \frac{1.000.000}{6{,}28 \times 60 \times 2}$$

$$X_C = 1.326\Omega.$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{1.000^2 + 1.326^2}$$

$$Z = 1.661\Omega.$$

Dispondo de Z, pode-se agora calcular I:

$$I = \frac{V_T}{Z} = \frac{50}{1.661}$$

$$I = 0{,}03A \text{ ou } I = 30mA.$$

Exemplo 4:

Determinar a corrente no circuito da figura abaixo.

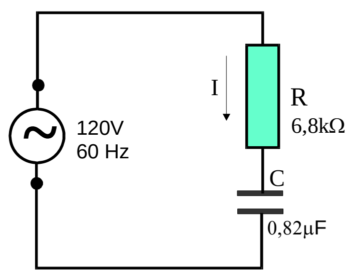
Dados:

$R = 6.800\Omega$

$C = 0{,}82\mu F$

$f = 60Hz$

$V_T = 120V$



Solução:

A impedância Z pode ser calculada como :

$$X_C = \frac{10^6}{2\pi \times f \times C} = \frac{1.000.000}{6{,}28 \times 60 \times 0{,}82}$$

$$X_C = 3.236\Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{6.800^2 + 3236^2}$$

$$Z = 7.530\Omega$$

Logo, a corrente I é dada por :

$$I = \frac{V_T}{Z} = \frac{120}{7.530}$$

$$I = 0{,}0159A.$$

As tensões no circuito RC série

As tensões no capacitor e no resistor estão defasadas 90º entre si, conforme mostra o gráfico fasorial do circuito RC série ilustrado na **Fig.11**. Como no caso da impedância, a tensão total é determinada pela resultante dos dois fasores, como ilustrado na **Fig.15**.

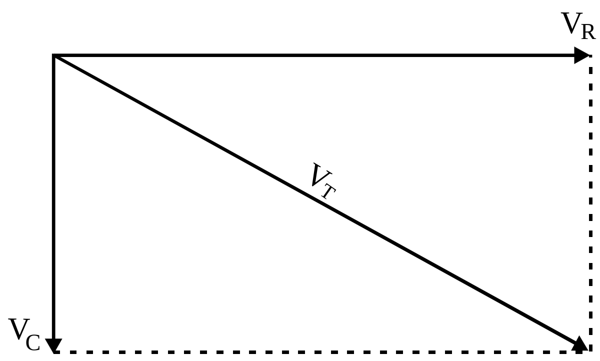


Fig.15 Tensão total.

$$V_T = \sqrt{V_R^2 + V_C^2} \qquad (6)$$

onde

- V_T = tensão aplicada ao circuito em volt
- V_R = queda de tensão no resistor em volt
- V_C = queda de tensão no capacitor em volt

Da **Eq.(6)** pode-se obter a tensão no resistor ou no capacitor :

$$V_R = \sqrt{V_T^2 - V_C^2} \qquad (7)$$

$$V_C = \sqrt{V_T^2 - V_R^2} \qquad (8)$$

Quando se dispõe da corrente no circuito, podem-se calcular as tensões no resistor e no capacitor com base na Lei de Ohm:

$$V_C = IX_C \qquad (9)$$

$$V_R = IR \qquad (10)$$

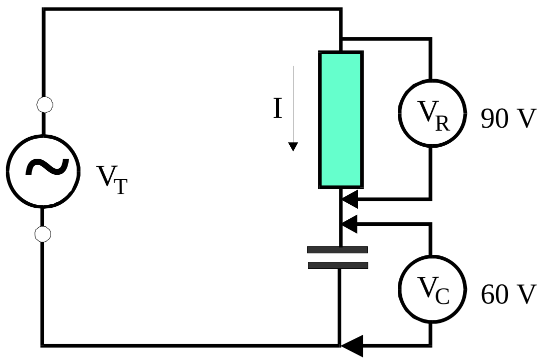
A seguir são apresentados dois exemplos de cálculo das tensões no circuito RC série em CA.

Exemplo 5:

Determinar a tensão V_T aplicada ao circuito da figura abaixo.

Dados:

$V_R = 90V$
$V_C = 60V$



Solução:

$$V_T = \sqrt{V_R^2 + V_C^2} = \sqrt{90^2 + 60^2}$$

$V_T = 108V$

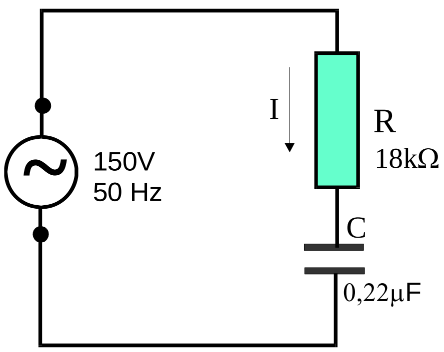
É importante observar que não se pode simplesmente somar as quedas de tensão V_C e V_R para obter-se V_T, porque as tensões são defasadas, resultando em uma soma fasorial.

Exemplo 6:

Determinar os valores de V_R e V_C no circuito da figura abaixo.

Dados:

$V_T = 150V_{CA}$
$R = 1.800\Omega$
$C = 0,22\mu F$
$f = 50Hz$



Solução:

$$X_C = \frac{10^6}{2\pi \times f \times C} = \frac{1.000.000}{6,28 \times 50 \times 0,22}$$

$$X_C = 14,476\Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{18.000^2 + 14.476^2}$$

$$Z = 23.099\Omega$$

Dispondo-se de Z e da tensão total, pode-se determinar a corrente :

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{150}{23.099}$$

$$I = 6,49mA$$

Portanto, tem-se que :

$$V_R = IR = 0,00649 \text{ x } 18.000$$

$$V_R = 116,8V$$

$$V_C = IX_C = 0,00649 \text{ x } 14.476$$

$$V_C = 93,9V$$

Esses valores de tensão podem ser conferidos da seguinte forma :

$$V_T = \sqrt{V_R^2 + V_C^2} = \sqrt{116,8^2 + 93,9^2}$$

$$V_T = 149,86V$$

Considerando o arredondamento, a equação da tensão total comprova que as tensões V_R e V_C estão corretas.

Rede de defasagem RC

O circuito RC série é utilizado normalmente como forma de se obter uma tensão CA defasada a partir de uma CA disponível. Quando o circuito RC é usado com essa finalidade, normalmente é chamado de **rede de defasagem RC.** A **Fig.16** ilustra este princípio.

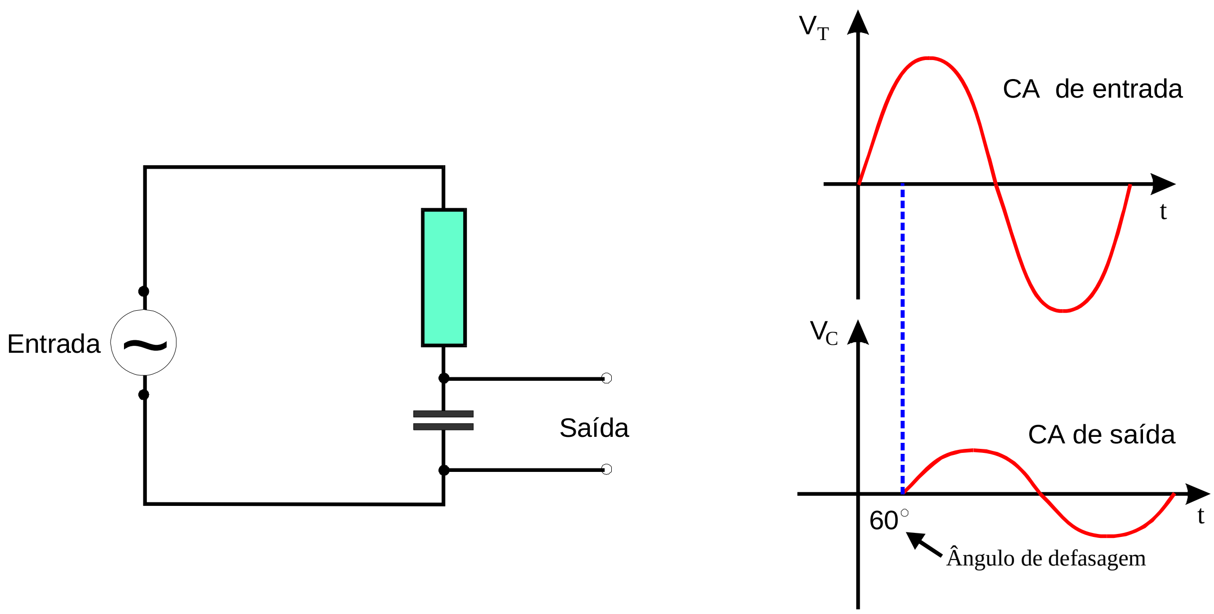


Fig.16 Rede e defasagem RC.

A tensão aplicada à rede de defasagem corresponde à tensão V_T do gráfico fasorial e a tensão de saída ao vetor V_C, uma vez que a saída é tomada sobre o capacitor.

O ângulo formado entre os fasores V_T e V_C (por exemplo: 60°), será o ângulo de defasagem entre as senóides de entrada e saída do circuito, como mostrado na **Fig.17**.

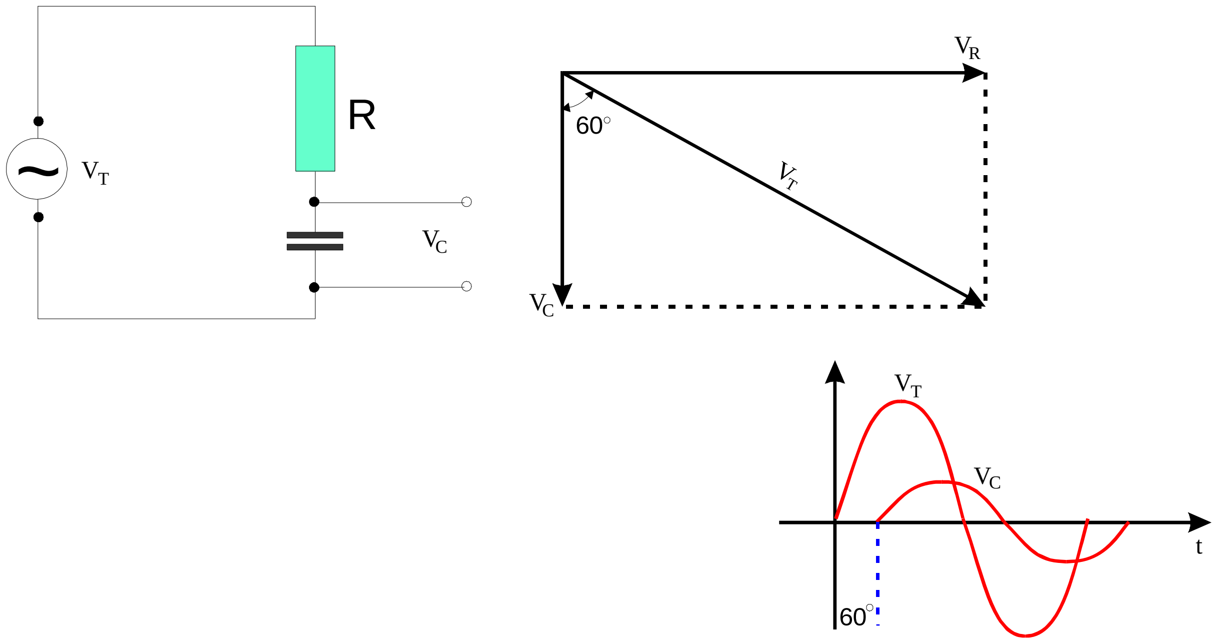


Fig.17 Representação das tensões V_T e V_C.

O ângulo de defasagem que uma rede RC provoca pode ser determinada a partir dos valores de V_R, V_C e V_C (medidos no circuito) ou dos valores de R e C e f.

DETERMINAÇÃO DO ÂNGULO DE DEFASAGEM

O gráfico fasorial do circuito RC pode ser apresentado de duas maneiras, conforme mostrado na **Fig.18**.

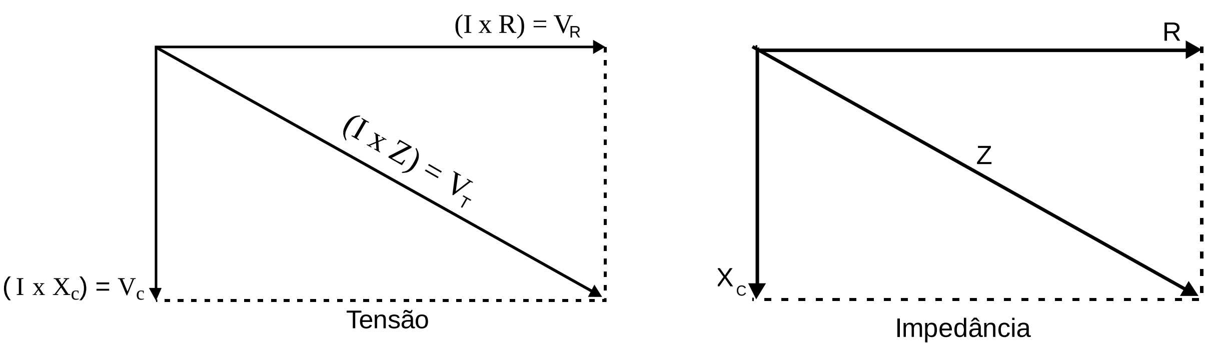


Fig.18 Gráfico fasorial do circuito RC.

Note que os ângulos nos dois gráficos são os mesmos.

Os fasores de V_C ou X_C podem ser trocados de posição de forma a se obter triângulos retângulos, conforme mostrado na **Fig.19**

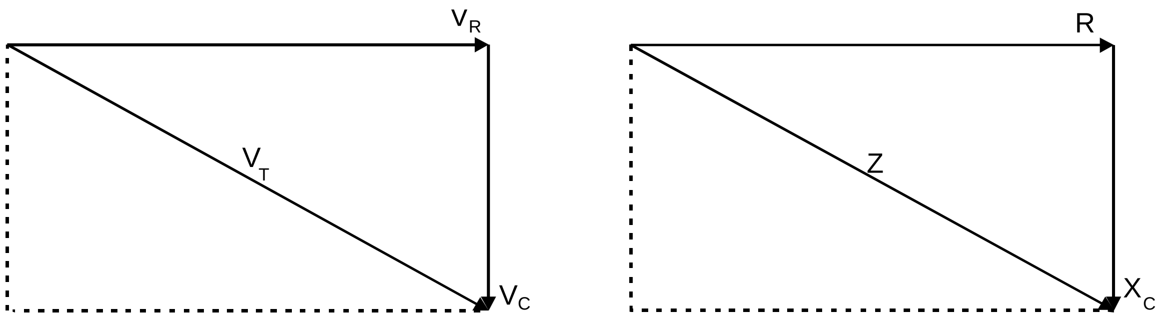


Fig.19 Fasores V_C e X_C.

O ângulo formado entre os fasores V_R e V_T (ou R e Z) é representado pela letra grega φ (lê-se fi), mostrado na **Fig.20.**

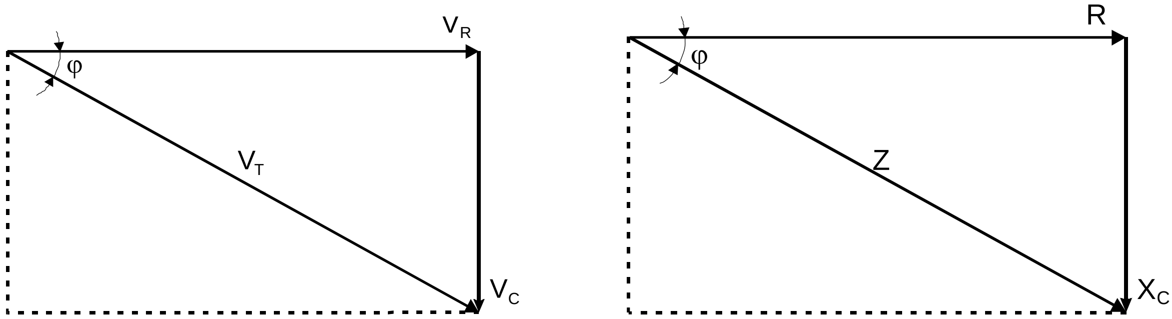


Fig.20 Ângulo entre os vetores V_R e V_T

Se os valores de V_R e V_T são conhecidos (medindo-se o circuito em funcionamento), pode-se determinar o cosseno do ângulo, conforme ilustrado na. **Fig.21**.

$$\cos \varphi = \frac{V_R}{V_T}$$

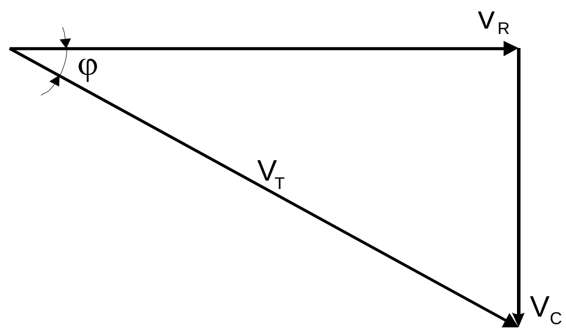


Fig.21 Cosseno do ângulo entre V_R e V_T.

Conhecendo-se o cosseno de um ângulo, o seu valor pode ser determinado através de uma tabela ou de uma máquina de calcular.

Da mesma forma, o ângulo φ pode ser determinado conhecendo-se os valores de R e Z, como ilustrado na **Fig.22**.

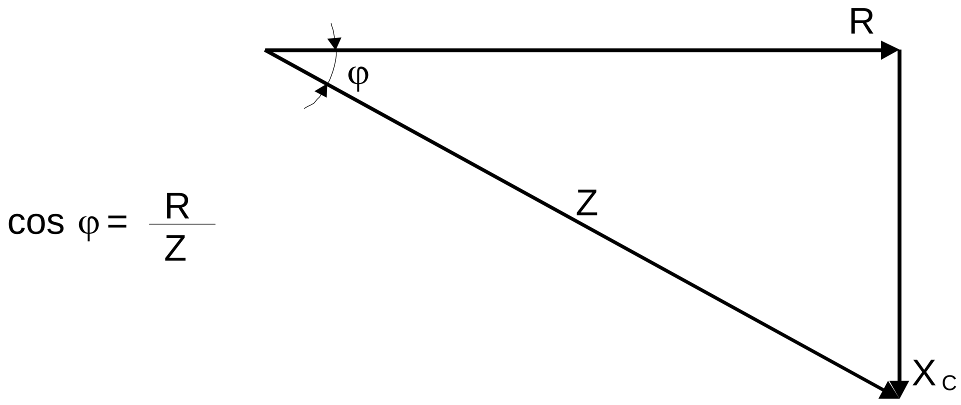


Fig.22 Valores de R e Z também levam a φ.

Sabendo-se o ângulo entre V_R e V_T (ou R e Z), pode-se determinar o ângulo entre V_C e V_T ou R e Z, como ilustrado na **Fig.23**.

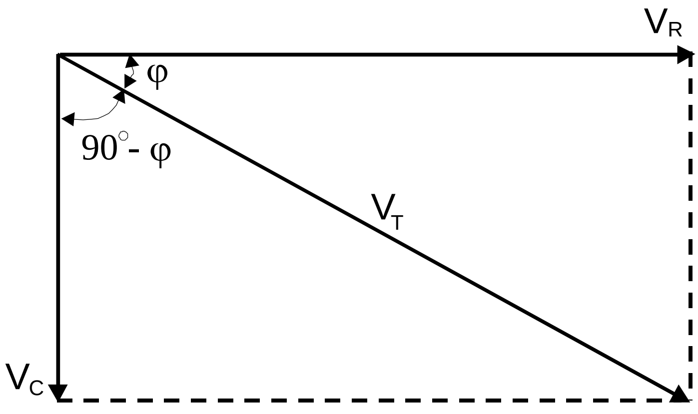


Fig.23 Ângulo entre os fasores V_C e V_T.

Quando o ângulo φ entre V_R e V_T (ou R e Z) é menor que 45°, o circuito é dito **predominantemente resistivo**.

Quando o ângulo φ entre V_R e V_T (ou R e Z) é maior que 45°, o circuito é dito **predominantemente capacitivo**.

A seguir, são apresentados dois exemplos de determinação de defasagem provocada por redes RC.

<u>Exemplo 7</u>:

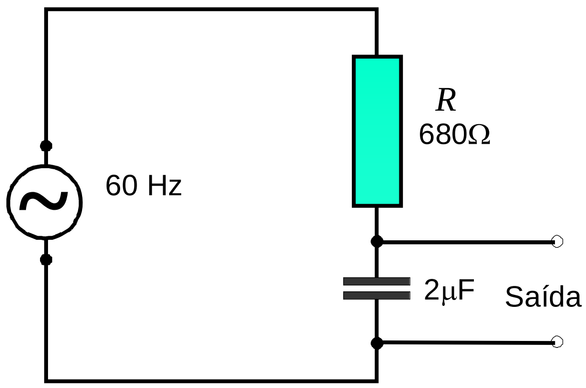
Determinar o ângulo de defasagem entre a CA de entrada e a CA de saída do circuito da figura abaixo.

Dados:

R = 680Ω

C = 2μF

f = 60Hz



<u>Solução</u>:

$$\cos\varphi = \frac{R}{Z}$$

$$X_C = \frac{10^6}{2\pi \times f \times C} = \frac{1.000.000}{6,28 \times 60 \times 2}$$

$$X_C = 1.326\Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + {X_C}^2} = \sqrt{680^2 + 1326^2}$$

$$Z = 1.490\Omega$$

Dispondo-se de R e Z, pode-se então calcular cos φ

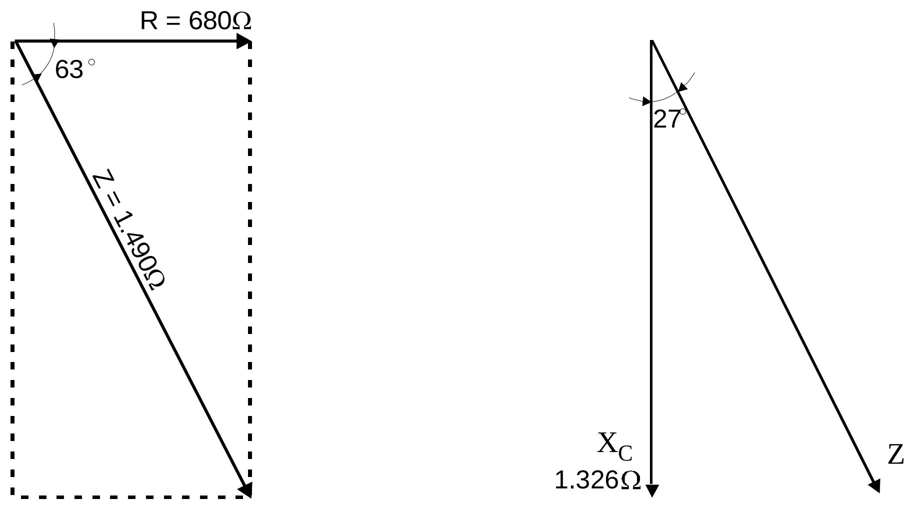
$$\cos\varphi = \frac{R}{Z} = \frac{680}{1.490}$$

$$\cos\varphi = 0,456$$

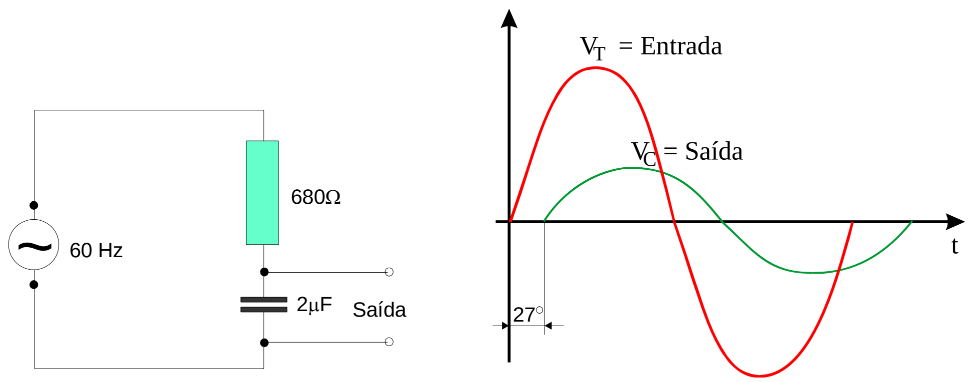
Consultando uma tabela de cossenos ou usando calculadora, tem-se que:

φ = 63° (circuito predominantemente capacitivo)

Conhecendo-se o ângulo φ entre R e Z, é possível construir o gráfico fasorial de R e Z e de X_C e Z, como mostrado na figura abaixo.



Isto significa que a senóide da saída do circuito (V_C) estará 27° defasada com relação a entrada, como pode ser visto na figura abaixo.



<u>Exemplo 8</u>:

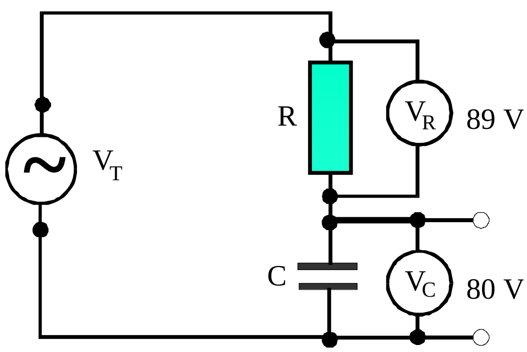
Determinar a defasagem entre a entrada e a saída da rede mostrada na figura abaixo.

Dados:

$V_R = 89V$

$V_C = 80V$

$V_T = 120V$

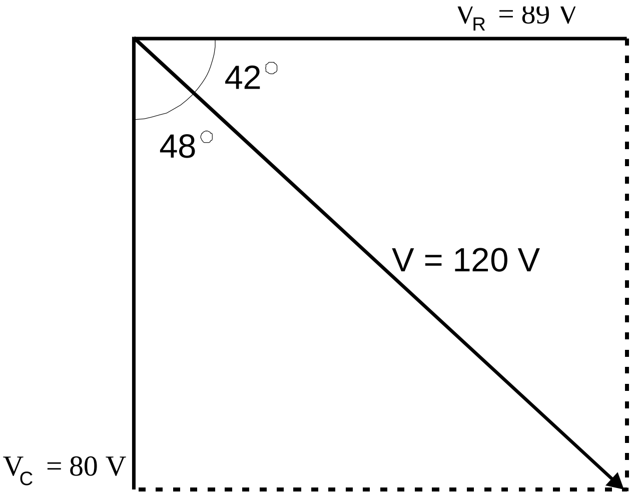


Solução:

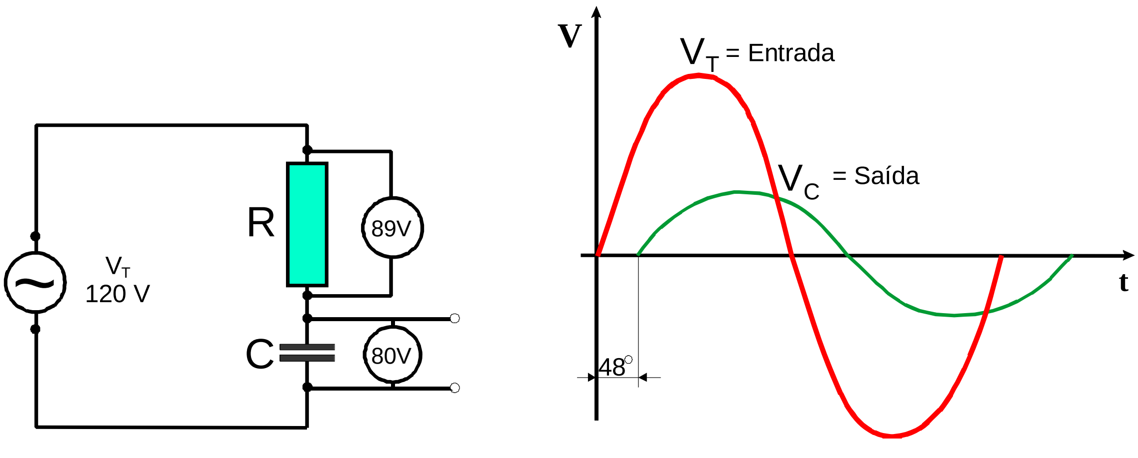
$$\cos\varphi = \frac{V_R}{V_T}$$

$$\cos\varphi = 0{,}74 \qquad \varphi = 42°$$

A figura mostra o gráfico fasorial das tensões.



Como pode ser visto na figura abaixo, a senóide de saída está defasada de 48° em relação à da entrada.



Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. O que se entende por impedância ?

2. Como se determina a impedância de um circuito RC série ?

3. Em um circuito RC série em CA, seja V_R e V_C as quedas de tensão sobre o resistor e o capacitor, respectivamente. Determinar a tensão V_T aplicada ao circuito.

BIBLIOGRAFIA

DAWES, CHESTER L. **Curso de Eletrotécnica**; Corrente Alternada. A course in electrical engineering Trad. de João Protásio Pereira da Costa. 18.ª ed., Porto Alegre, Globo, 1974. vol.4

VAN VALKENBURG, NOOGER & NEVILLE. **Eletricidade Básica**. 5.ª ed., Rio de Janeiro.

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Valorização das Pessoas – Reconhecimento e respeito ás pessoas pelo seu trabalho e valorização destas como agentes de mudança.

Introdução

Este fascículo, que tratará do circuito RC paralelo em CA, dá seqüência à série de estudos sobre o comportamento de pequenas associações de componentes ligadas a fontes de corrente alternada.

Os circuitos paralelos envolvendo resistores e capacitores se comportam de forma diferente dos circuitos série.

Leia atentamente as informações apresentadas e realize todas as atividades programadas para ter êxito no aprendizado.

Para ter sucesso no desenvolvimento do conteúdo e atividades deste fascículo, o leitor já deverá ter conhecimentos relativos a:

- Resistores em corrente alternada.
- Capacitores em corrente alternada.
- Representação fasorial de parâmetros de corrente alternada.

Circuito RC paralelo em corrente alternada

A característica fundamental dos circuitos paralelos consiste no fato de que a tensão aplicada a todos os componentes é a mesma. Por esta razão a tensão é tomada como referência para uma análise gráfica dos circuitos paralelos.

A aplicação de tensão alternada V ao circuito provoca o aparecimento de uma corrente no resistor I_R. Esta corrente está em fase com a tensão aplicada. A mesma tensão aplicada ao resistor é aplicada sobre o capacitor, dando origem a uma corrente I_C.

Considerando que a corrente no capacitor está sempre adiantada 90º em relação a tensão, pode-se desenhar o gráfico senoidal completo do circuito RC paralelo, como pode ser visto na **Fig.1**.

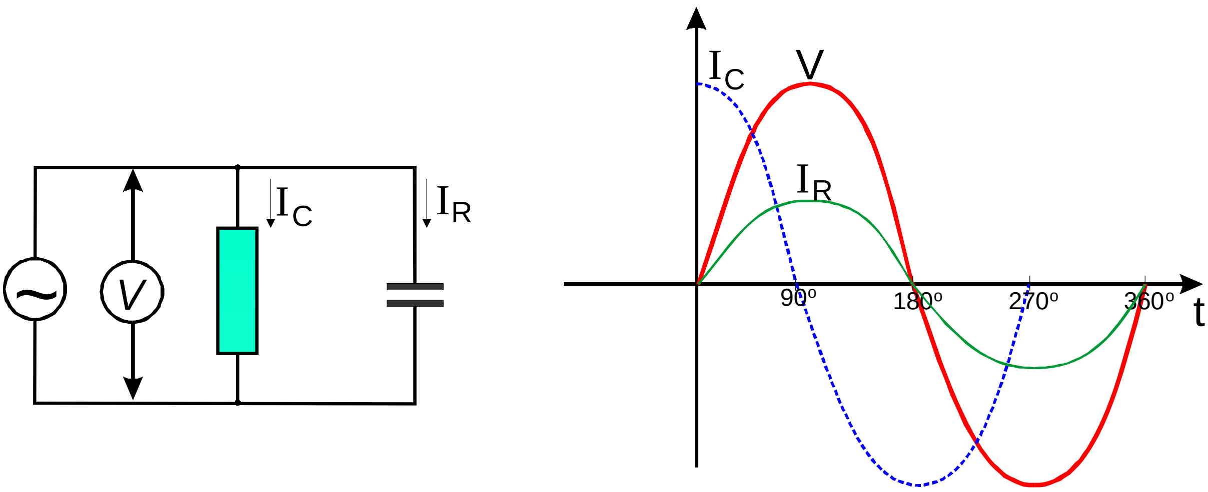


Fig.1 Gráfico senoidal completo do circuito RC paralelo em CA.

Observa-se através do gráfico senoidal que o circuito RC paralelo provoca uma defasagem entre as correntes no resistor e no capacitor.

O gráfico senoidal pode ser representado sob a forma de fasores, conforme mostrado na **Fig.2**.

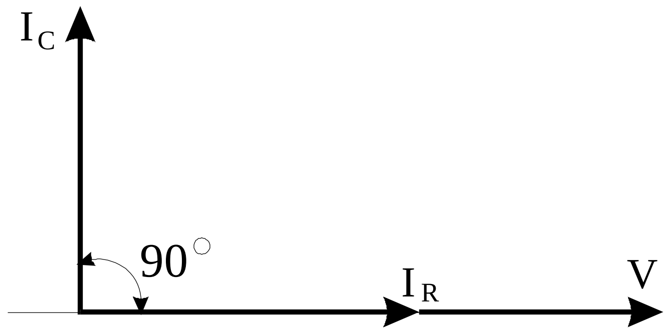


Fig.2 Diagrama fasorial do circuito RC paralelo em CA.

O gráfico fasorial mostra a tensão aplicada, a corrente no resistor em fase com a tensão aplicada e a corrente no capacitor adiantada 90º.

As correntes no circuito RC paralelo em corrente alternada

No circuito RC paralelo, existem três correntes envolvidas:

- A corrente no resistor I_R.
- A corrente no capacitor I_C.
- A corrente total I_T.

A **Fig.3** mostra um circuito RC paralelo em CA com instrumentos destinados à medição dessas três correntes.

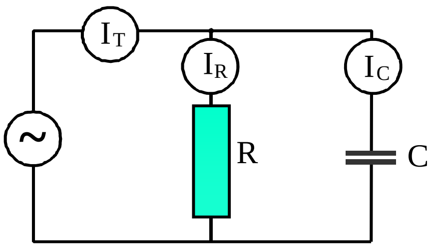


Fig.3 Medição de I_R, I_C e I_T.

A corrente eficaz no resistor I_R é dada pela Lei de Ohm.

$$I_R = \frac{V}{R} \qquad (1)$$

A corrente eficaz no capacitor também é dada pela Lei de Ohm, usando a reatância capacitiva.

$$I_C = \frac{V}{X_C} \qquad (2)$$

A corrente total é resultante da soma fasorial entre I_C e I_R porque estas correntes estão defasadas entre si.

Os fasores I_R, I_C e I_T formam um triângulo. Dessa forma, a corrente total I_T é encontrada aplicando-se o Teorema de Pitágoras, como ilustrado na **Fig.4**.

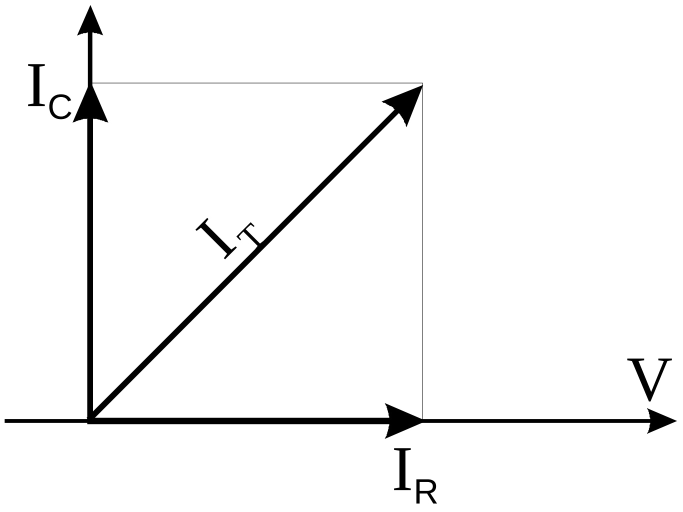


Fig.4 Obtenção da corrente total I_T.

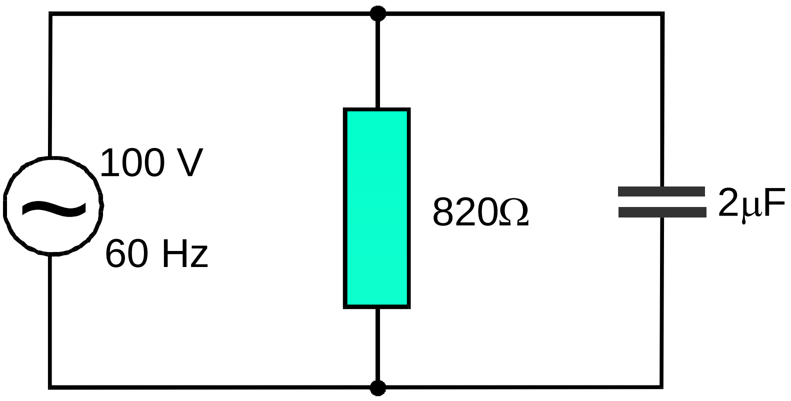
Logo,

$$I_T = \sqrt{I_R^2 + I_C^2} \quad (3)$$

A seguir são apresentados dois exemplos de aplicação da equação da corrente total.

<u>Exemplo 1</u>:

Dado o circuito da figura abaixo, determinar I_R, I_C e I_T.



Solução:

De acordo com a **Eq.(1)**, a corrente I_R é dada por :

$$I_R = \frac{100}{820} = 0{,}122\ \text{A}$$

Por outro lado, a corrente I_C é dada de acordo com a **Eq.(2)** por :

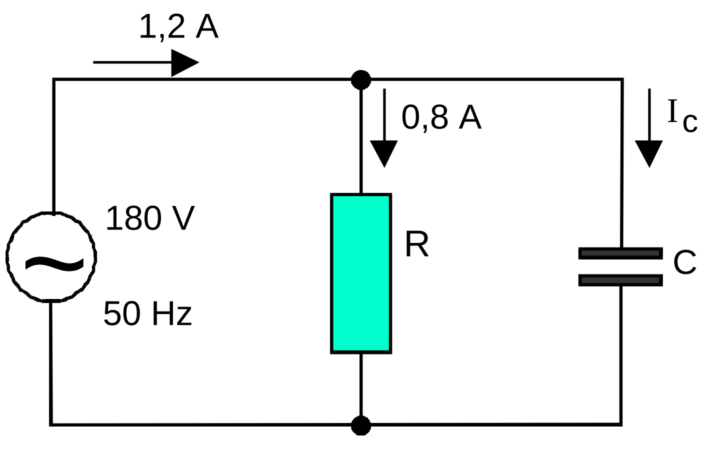
$$I_C = \frac{100}{\dfrac{1}{2\pi \times 60 \times 2 \times 10^{-6}}} = 0{,}075\ \text{A}$$

Logo, da **Eq.(3)**, tem-se que :

$$I_T = \sqrt{0{,}122^2 + 0{,}075^2} = 0{,}143\ \text{A}$$

Exemplo 2:

Determinar I_C, R e C no circuito da figura abaixo.



Solução:

I_C é dada por :

$$I_C = \sqrt{I_T^{\,2} - I_R^{\,2}} = \sqrt{1{,}2^2 - 0{,}8^2}$$

$$I_C = 0{,}89\ \text{A}$$

Por outro lado, o valor de C é obtido da **Eq.(2)** da seguinte forma :

$$I_C = \frac{V}{\frac{10^6}{2\pi \times f \times C}}$$

$$C = \frac{10^6 \times I_C}{2\pi \times f \times V} = \frac{10^6 \times 0{,}89}{2\pi \times 50 \times 180}$$

$$C = 15{,}7\ \mu F$$

O valor de R é dado por :

$$R = \frac{V}{I_R} = \frac{180}{0{,}8}$$

$$R = 225\,\Omega$$

Impedância do circuito RC paralelo

A impedância Z é a oposição total que o circuito apresenta à circulação da corrente.

Em circuitos reativos (que têm reatâncias envolvidas) do tipo paralelo, a impedância Z somente pode ser calculada se a corrente total for conhecida.

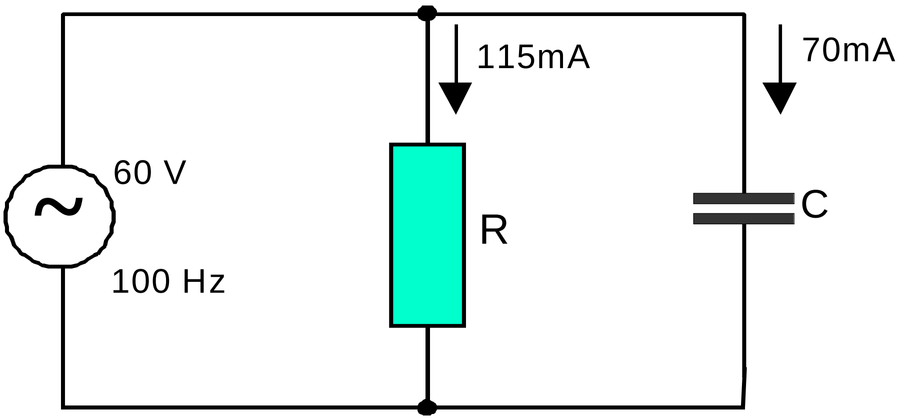
$$Z = \frac{V}{I_T} \qquad (4)$$

Nesta equação, os valores de Z estão em ohms, V em volts e I_T em ampères.

A seguir são apresentados dois exemplos, utilizando a equação apresentada.

Exemplo 3:

Dado o circuito da figura abaixo, determinar I_T e Z.



Solução:

O valor de I_T é obtido da **Eq.(3)** da seguinte forma :

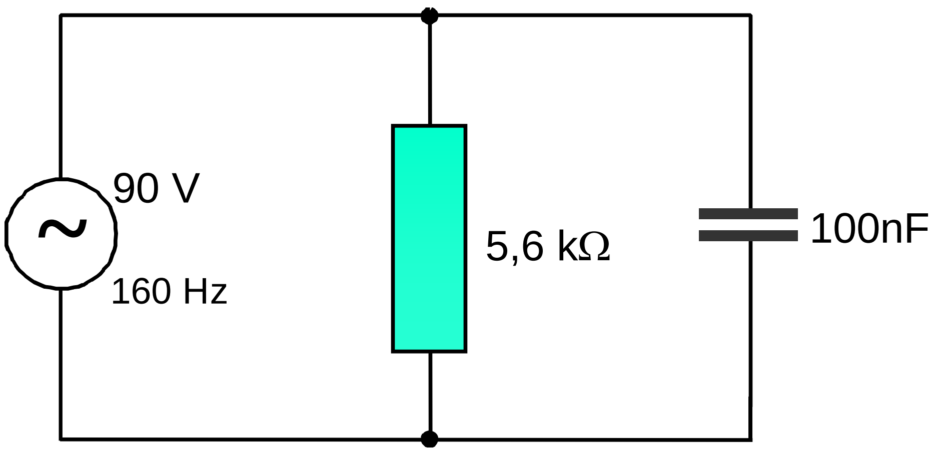
$$I_C = \sqrt{115^2 - 70^2} = 134{,}6\,\text{mA}$$

O valor de Z é obtido por :

$$Z = \frac{V}{I_T} = \frac{60}{134{,}6 \times 10^{-3}} = 445{,}8\,\Omega$$

Exemplo 4:

Dado o circuito da figura abaixo, determinar I_R, I_C, I_T e Z.



Solução:

Cálculo de I_R :

$$I_R = \frac{V}{R} = \frac{90}{5{,}6 \times 10^{-3}}$$

$$I_R = 16{,}07\,\text{mA}$$

Cálculo de I_C :

$$X_C = \frac{10^6}{2\pi \times f \times C} = \frac{10^6}{2\pi \times 160 \times 100 \times 10^{-3}}$$

$$X_C = 9.952\Omega$$

$$I_C = \frac{V}{X_C} = \frac{90}{9.952}$$

$$I_C = 9{,}05mA$$

Cálculo de I_T :

$$I_T = \sqrt{{I_R}^2 + {I_C}^2} = \sqrt{16{,}07^2 + 9{,}05^2}$$

$$I_T = 18{,}44\,mA$$

Cálculo de Z :

$$Z = \frac{V}{I_T} = \frac{90}{18{,}44 \times 10^{-3}}$$

$$Z = 4{,}88\,k\Omega$$

Defasagem entre as correntes

Como resultado da aplicação de um circuito RC paralelo a uma rede de CA, obtêm-se três correntes defasadas entre si.

Os ângulos de defasagem entre I_R e I_T e entre I_C e I_T podem ser determinados com base no triângulo retângulo formado pelos três fasores, como mostra a **Fig. 5**.

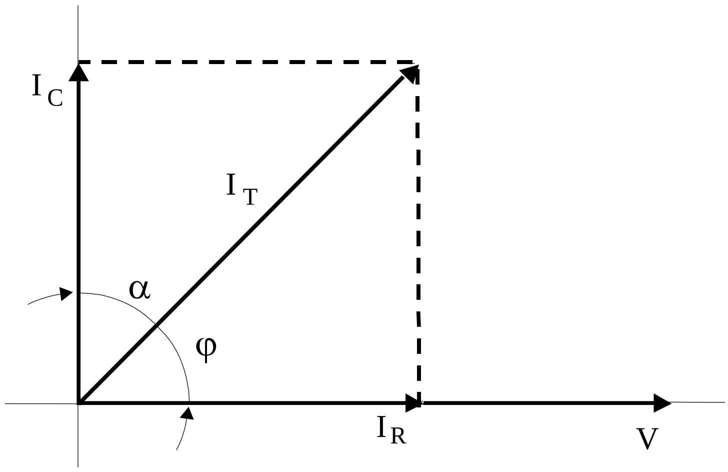


Fig.5 Ângulos de defasagem entre as correntes I_R e I_T e entre I_C e I_T.

O ângulo φ entre I_R e I_T pode ser definido a partir da relação cosseno:

$$\cos \varphi = \frac{I_R}{I_T} \quad (5)$$

$$\varphi = \arccos \frac{I_R}{I_T} \quad (6)$$

O valor numérico do ângulo é encontrado consultando uma tabela de

Dispondo-se do ângulo entre IR e IT, pode-se facilmente determinar o ângulo (entre IC e I**T**.

Quando o ângulo (é menor que 45º, isto significa que IR é maior que IC e se diz que o circuito é predominantemente resistivo.

Quando o ângulo (é maior que ??5(, isto significa que IC é maior que IR e o circuito é predominantemente capacitivo.

1.

Denhe o gráfico senoidal completo de um circuito RC paralelo em corrente alternada.

2. Como se determina a corrente total I_T de um circuito RC paralelo em corrente alternada ?

BIBLIOGRAFIA

DAWES, CHESTER L. **Curso de Eletrotécnica**, Corrente Alternada. A course in electrical engineering. Trad. de João Protásio Pereira da Costa. 18ª. ed., Porto Alegre, Globo, 1979. vol.4

MARCUS, ABRAHAM. **Eletricidade Básica.** Trad. de Ernst Muhr. São Paulo, Importadora de livros, c1964, 194p. ilust.

VAN VALKENBURG, NOOGER & NEVILLE. **Eletricidade Básica**. 5ª.ed., Rio de Janeiro, Freitas Bastos, 1960, vol.4 ilust.

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Imagem Institucional – Desenvolver ações que atendam as reais necessidades do mercado.

Introdução

Os indutores também podem ser associados em série ou em paralelo com resistores formando circuitos RL.

A partir deste fascículo, inicia-se o estudo desses circuitos, denominados de **circuitos reativos indutivos**.

Este fascículo tratará do circuito RL série, abordando os aspectos relativos a impedância, tensão e corrente, visando a possibilitar a compreensão do comportamento desses circuitos.

Para ter sucesso no desenvolvimento do conteúdo e atividades deste fascículo, o leitor já deverá ter conhecimentos relativos a:

- Representação fasorial de parâmetros elétricos.
- Indutores.

O circuito RL série em corrente alternada

Quando se aplica a um circuito série RL uma fonte de corrente alternada senoidal, a corrente circulante também assume a forma senoidal, como pode ser visto na **Fig.1**.

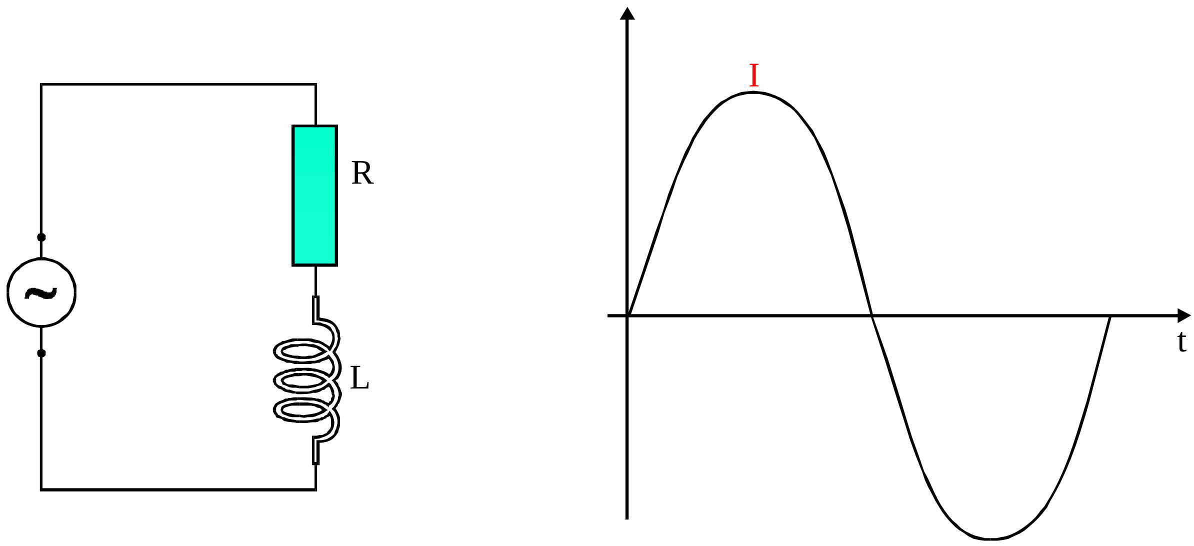


Fig.1 Circuito RL série.

Como em todo o circuito série, a corrente é única no circuito ($I_R = I_L = I$). Por esta razão, a corrente é tomada como referência para o estudo do circuito RL série.

A circulação de corrente através do resistor dá origem a uma queda de tensão sobre o componente.

A queda de tensão no resistor ($V_R = I \times R$) está em fase com a corrente, como ilustrado na **Fig.2**.

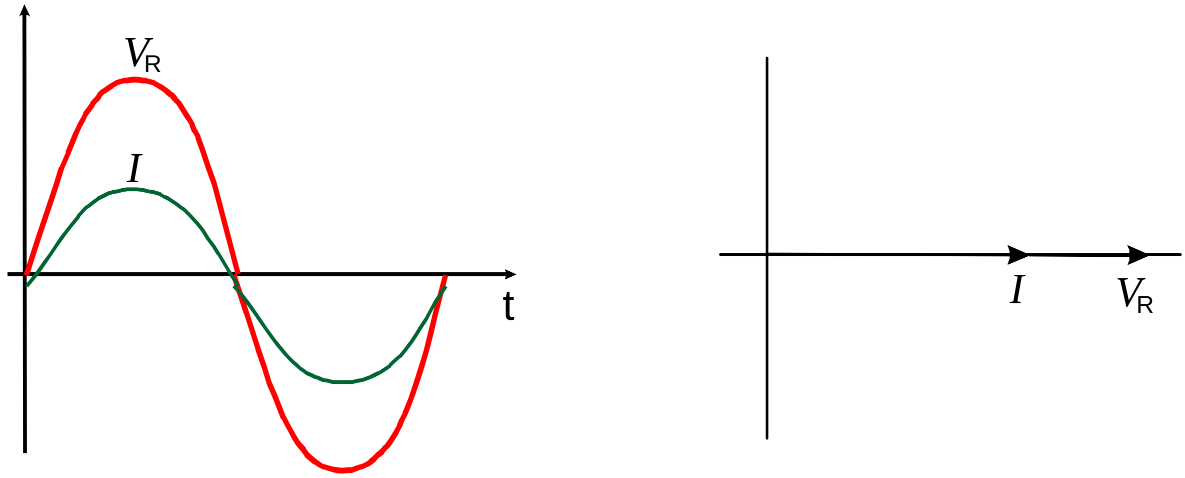


Fig.2 Tensão em fase com a corrente no resistor.

Essa mesma corrente ao circular no indutor dá origem a uma queda de tensão sobre o componente. Devido à auto-indutância, a queda de tensão no indutor ($V_L = I \times X_L$) está adiantada 90º em relação à corrente do circuito, como pode ser visto na **Fig.3**.

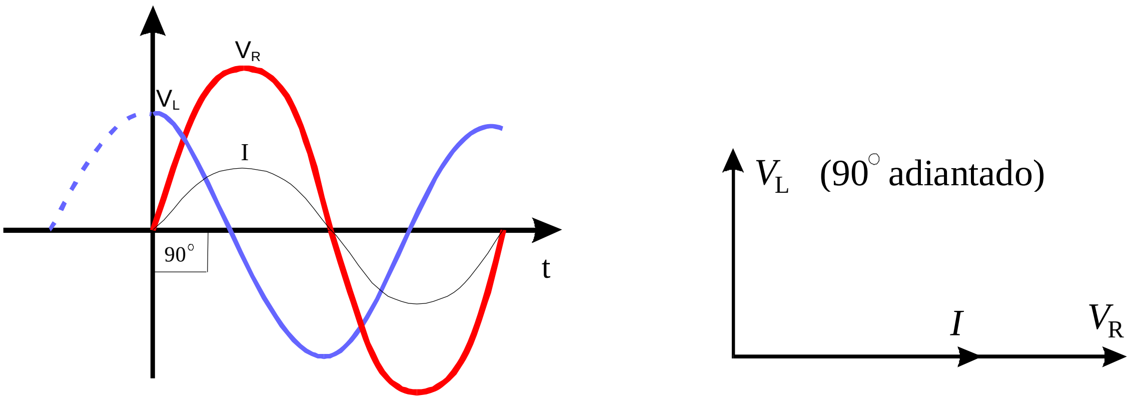


Fig.3 Tensão no indutor adiantada 90° em relação a corrente.

A **Fig.3** representa o gráfico senoidal e fasorial completo para o circuito RL série.

Impedância e corrente no circuito RL série em corrente alternada

O circuito RL série usado em corrente alternada apresenta uma oposição à circulação de corrente, denominada impedância.

A fórmula para calcular esta impedância pode ser encontrada a partir da análise do gráfico fasorial do circuito mostrado na **Fig.1**. A **Fig.4** mostra novamente este diagrama fasorial.

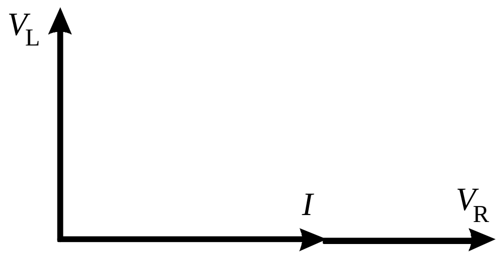


Fig.4 Gráfico fasorial para circuito RL.

O fasor V_L é dado por $I \times X_L$ e o fasor V_R representa $I \times R$.

Dividindo-se as intensidades dos fasores pela intensidade de I, o gráfico não se altera e assume a característica mostrada na **Fig.5**.

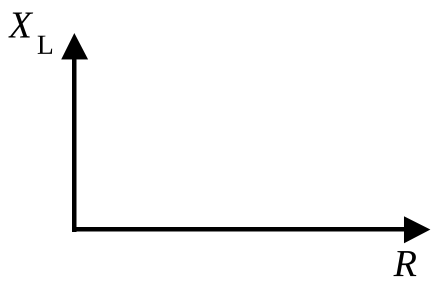


Fig.5 Diagrama fasorial X_L versus R.

A resultante do sistema de fasores fornece a impedância do circuito RL série, e pode ser calculado pelo uso do Teorema de Pitágoras.

$$Z^2 = R^2 + X_L{}^2$$

Isolando-se Z, tem-se:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L{}^2} \qquad (1)$$

onde

Z = impedância em ohms
R = resistência em ohms
X_L = reatância em ohms.

A partir dessa equação, podem ser isoladas as equações que determinam R e X_L.

$$R = \sqrt{Z^2 - X_L{}^2}$$

$$X_L = \sqrt{Z^2 - R^2}$$

<u>Exemplo 1</u>

Um indutor de 200mH em série com um resistor de 1.800Ω é conectado a uma fonte CA de 1.200Hz . Determinar a impedância do circuito.

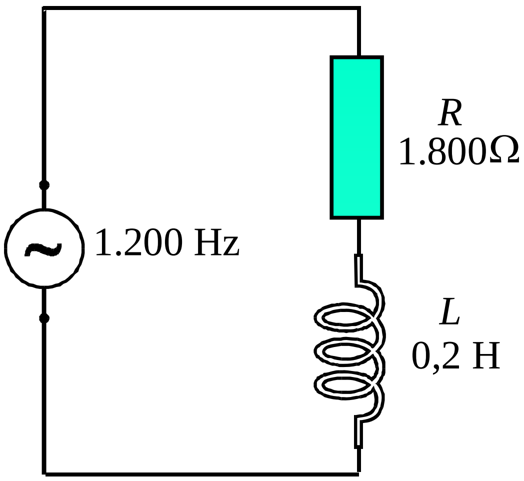
<u>Solução</u> :

$X_L = 2\pi \times f \times L = 6{,}28 \times 1.200 \times 0{,}2$

$X_L = 1.507{,}2\ \Omega$

$Z = \sqrt{R^2 + X_L{}^2} = \sqrt{1.800^2 + 1.507{,}2^2}$

$Z = 2.347{,}7\ \Omega$



A partir do momento em que se dispõe da impedância de um circuito, pode-se calcular a corrente a partir da Lei de Ohm para circuitos de corrente alternada.

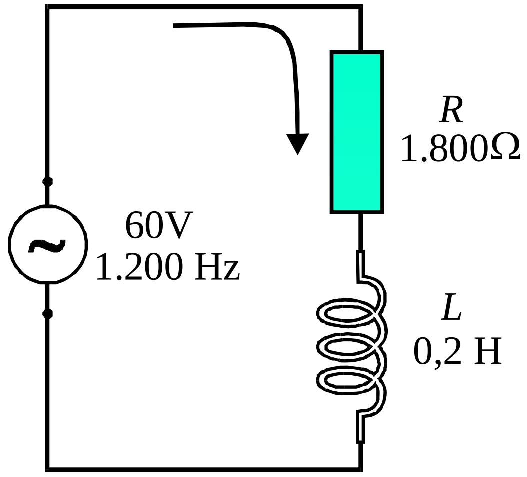
Exemplo 2

Aproveitando o Exemplo 1, que corrente circulará no circuito se a fonte fornece 60V (eficazes) ao circuito?

Solução :

$$I = \frac{V_T}{Z} = \frac{60}{2.347,7}$$

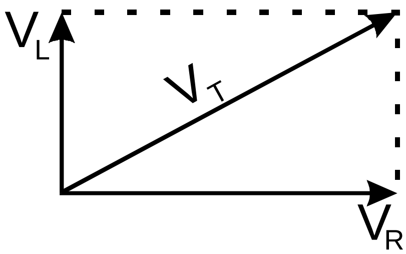
$I = 25,6$ mA



As tensões no circuito RL série em corrente alternada

No gráfico fasorial do circuito RL série a tensão no indutor V_L está defasada 90º da tensão no resistor V_R devido ao fenômeno de auto-indução.

A tensão total V_T é a resultante do sistema de fasores, e é calculada através do Teorema de Pitágoras, como ilustrado na **Fig.6**.



$$V_T = \sqrt{V_R{}^2 + V_L{}^2} \tag{2}$$

Fig.6 Cálculo da resultante V_T.

Cabe ressaltar que a tensão total **não pode** ser encontrada através de soma simples ($V_R + V_L$) porque estas tensões estão defasadas, entre si.

A fórmula de V_T pode ser desdobrada para isolar os valores de V_R e V_L.

$$V_R = \sqrt{V_T{}^2 - V_L{}^2}$$

$$V_L = \sqrt{V_T{}^2 - V_R{}^2}$$

Os valores de V_R e V_L podem ser calculados separadamente, se a corrente é conhecida, através da Lei de Ohm.

A seguir são mostrados dois exemplos que ilustram a utilização das equações.

Exemplo 3:

Determinar as tensões sobre o resistor e o indutor do circuito da figura abaixo.

Solução :

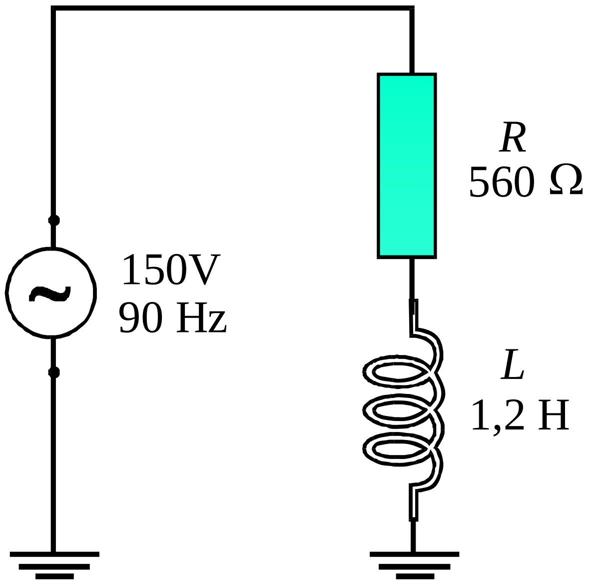
$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

$$X_L = 2\pi \times f \times L = 6{,}28 \times 90 \times 1{,}2$$

$$X_L = 678{,}2\ \Omega$$

$$Z = \sqrt{560^2 + 678{,}2^2} = \sqrt{773.555}$$

$$Z = 879\ \Omega$$



$$I = \frac{V_T}{Z} \qquad I = \frac{150}{879} \qquad I = 0{,}171\ \text{A}$$

$$V_R = I \times R \qquad V_R = 0{,}171 \times 560 \qquad V_R = 95{,}8\ \text{V}$$

$$V_L = \text{I} \times X_L \qquad V_L = 0{,}171 \times 678{,}2 \qquad V_L = 115{,}9\ \text{V}$$

As tensões V_R e V_L podem ser conferidas, aplicando-se os seus valores na **Eq.(2)** de V_T.

$$V_T = \sqrt{V_R^2 + V_L^2} \qquad V_T = \sqrt{95{,}8^2 + 115{,}9^2}$$

$$V_T = \sqrt{22.610{,}45} \qquad V_T = 150{,}36\ \text{V}$$

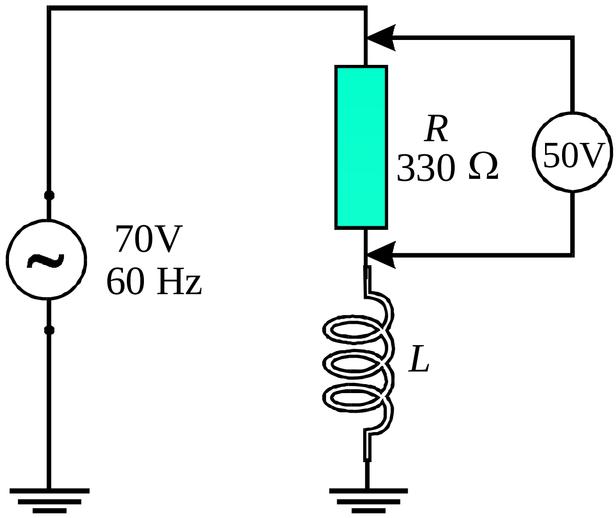
A diferença de 0,36V deve-se as aproximações usadas.

<u>Exemplo 4</u>:

Determinar a corrente que circula no circuito da figura abaixo.

<u>Solução</u> :

Com V_R e R , pode-se determinar I :



$$I = \frac{V_R}{R} = \frac{50\text{ A}}{330\,\Omega}$$

I = 0,152 A

Com V_T e V_R , pode-se determinar V_L :

$$V_L = \sqrt{V_T{}^2 - V_R{}^2} = \sqrt{70^2 - 50^2}$$

V_L = 49 V

Com V_L e I, pode-se determinar X_L :

$$X_L = \frac{V_L}{I} = \frac{49}{0{,}152} \qquad X_L = 322{,}4\ \Omega$$

Então, pode-se determinar L :

$$X_L = 2\pi \times f \times L$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi \times f} = \frac{322{,}4}{6{,}28 \times 60} \qquad L = 0{,}86\text{ H}$$

Rede de defasagem RL

O circuito RL série usado em corrente alternada permite que se obtenha uma tensão alternada defasada da tensão aplicada, como ilustrado na **Fig.7**.

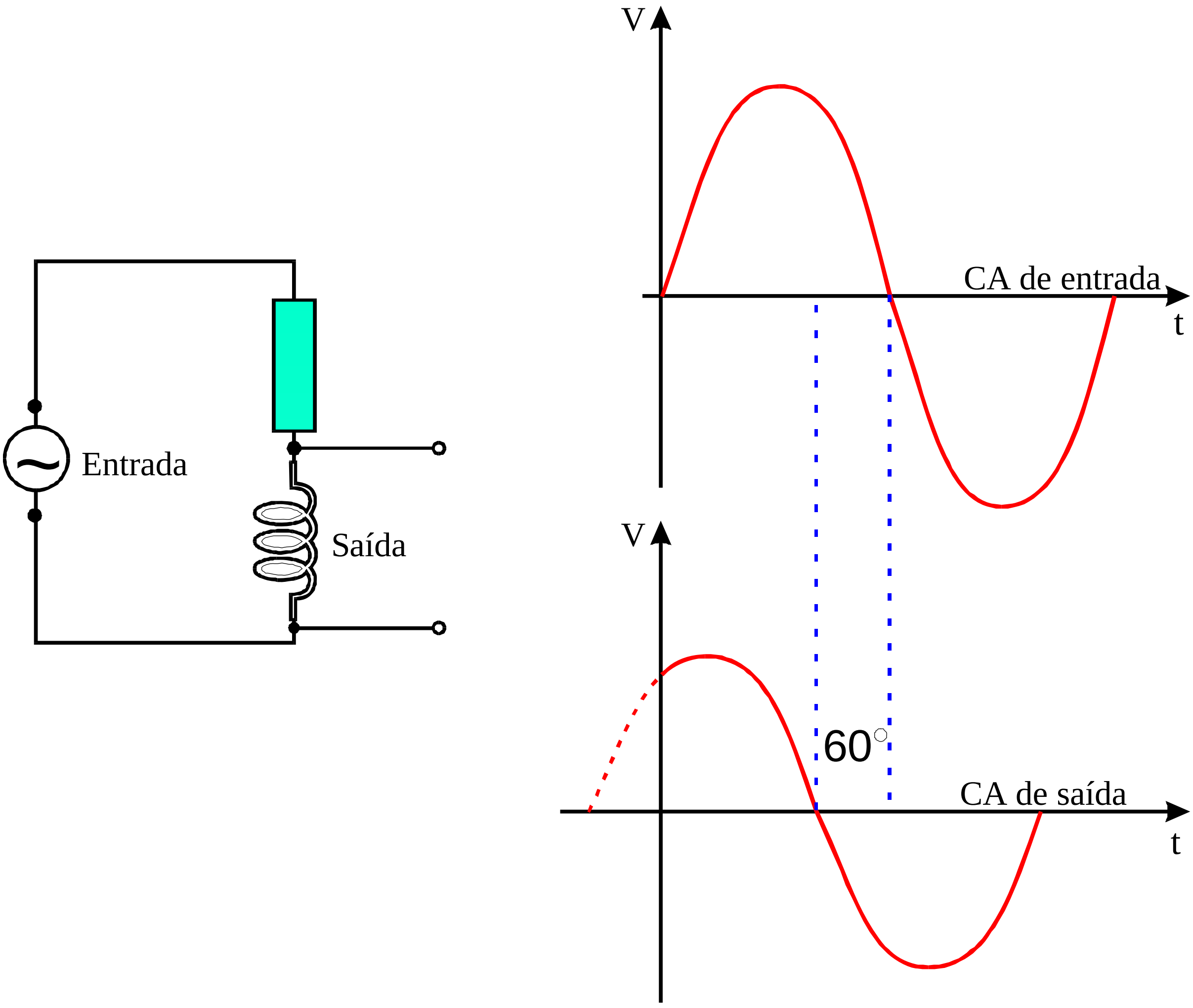


Fig.7 Rede de defasagem RL.

A tensão aplicada à rede RL corresponde à tensão V_T no gráfico fasorial e a tensão de saída ao fasor V_L, uma vez que a saída é tomada sobre o indutor.

Pelo gráfico fasorial, verifica-se que a tensão V_L (tensão de saída) está adiantada em relação a tensão V_T (tensão de entrada). O ângulo entre os fasores V_L e V_T é o ângulo de defasagem entre entrada e saída, como pode ser visto na **Fig. 8**.

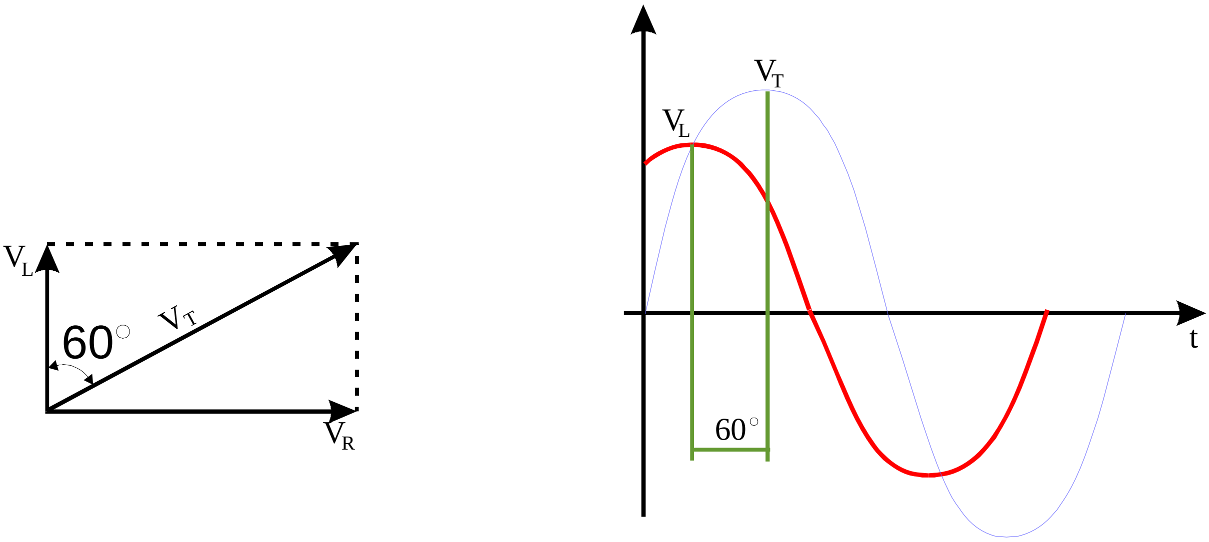


Fig.8 Defasagem entre as tensões V_L e V_T.

O ângulo de defasagem pode ser determinado a partir do gráfico fasorial da impedância ou das tensões, como mostrado na **Fig.9**.



Fig.9 Gráfico fasorial da impedância e das tensões.

O ângulo entre V_R e V_T é o ângulo φ que pode ser encontrado através das seguintes relações do triângulo retângulo :

$$\cos\varphi = \frac{R}{Z} \qquad \text{ou} \qquad \cos\varphi = \frac{V_R}{V_T}$$

$$\varphi = \arccos\frac{R}{Z} \qquad \text{ou} \qquad \varphi = \arccos\frac{V_R}{V_T}$$

Tendo-se o ângulo φ (ângulo entre V_R e V_T), determina-se o ângulo α (entre V_T e V_L).

$$\alpha = 90° - \varphi$$

Quando o efeito resistivo no circuito é maior que o indutivo ($R > X_L$), o ângulo φ é menor que 45º e o circuito é dito **predominantemente resistivo.**

Se, por outro lado, o efeito indutivo é maior que o resistivo ($X_L > R$), o ângulo φ é maior que 45º e o circuito é dito **predominantemente indutivo.**

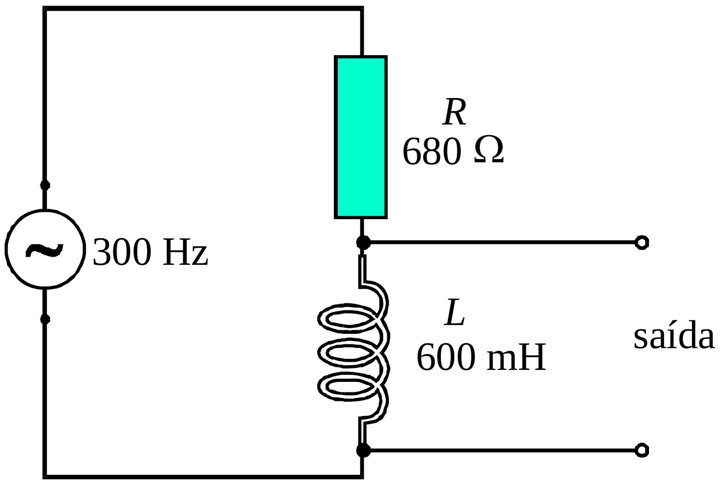
A seguir são mostrados dois exemplos de determinação do ângulo de defasagem provocado por um circuito RL série em corrente alternada.

Exemplo 5:

Determinar o ângulo de defasagem entre a saída e a entrada do circuito da figura abaixo.

Solução :

$$\cos\varphi = \frac{R}{Z}$$



Determinação de Z :

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

$$X_L = 2\pi \times f \times L$$

$$X_L = 6{,}28 \times 300 \times 0{,}6$$

$$X_L = 1.130\ \Omega$$

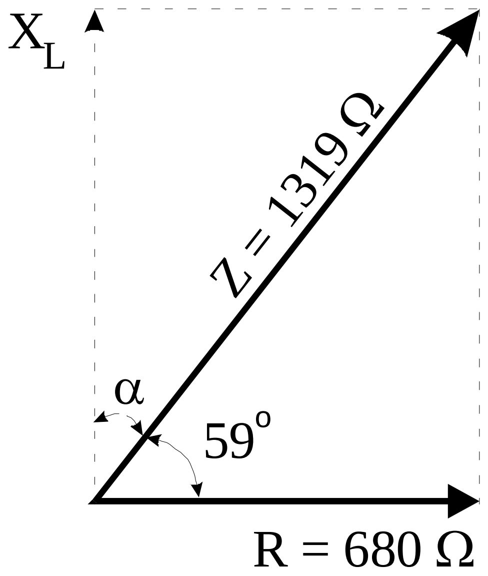
$$Z = \sqrt{680^2 + 1.130^2} \qquad Z = \sqrt{1.739.300} \qquad Z = 1.319\ \Omega$$

$$\cos\varphi = \frac{R}{Z} \qquad \cos\varphi = \frac{680}{1.319} \qquad \cos\varphi = 0{,}515$$

Consultando-se uma tabela de cossenos ou usando-se uma calculadora, tem-se que:

$\varphi = 59°$ (circuito predominantemente indutivo)

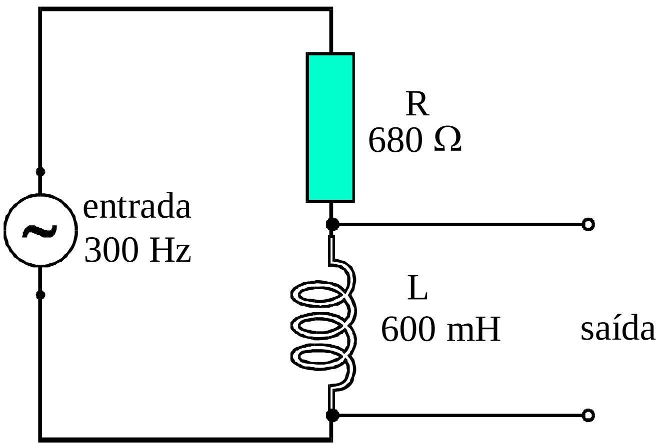
Pode-se ainda construir o gráfico fasorial de *R* e *Z* :

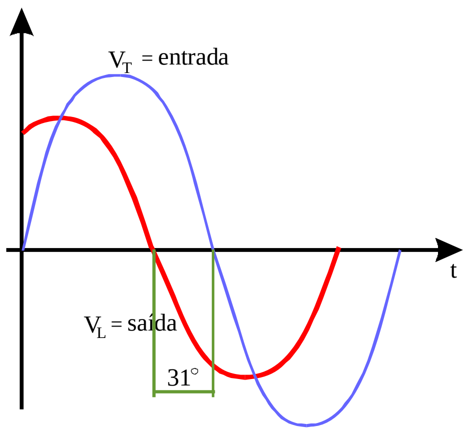


O ângulo entre *Z* e X_L pode ser determinado da seguinte forma:

$\alpha = 90° - \varphi$ $\alpha = 90° - 59°$ $\alpha = 31°$

Isto significa que a senóide de saída (V_L) está 31º adiantada com relação à entrada, como ilustrado na figura abaixo.





Exemplo 6:

Determinar a defasagem entre a saída e a entrada na rede mostrada na figura abaixo.

Solução :

$$\cos \varphi = \frac{V_R}{V_T}$$

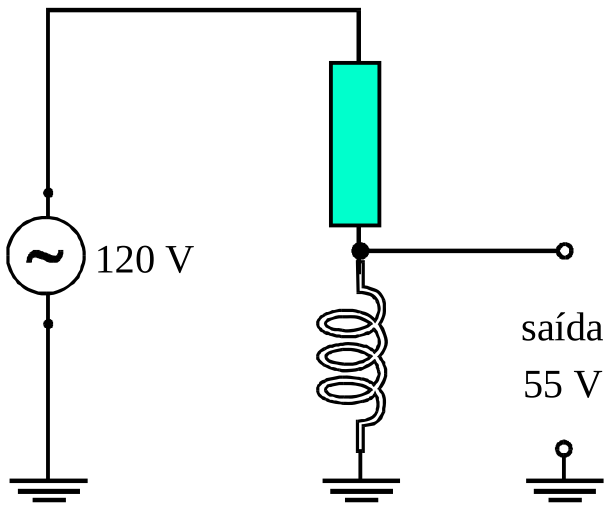
Determinação de V_R :

$$V_T = \sqrt{V_R^2 + V_L^2}$$

$$V_R = \sqrt{V_T^2 - V_L^2}$$

$$V_R = \sqrt{120^2 - 55^2}$$

$$V_R = 107V$$



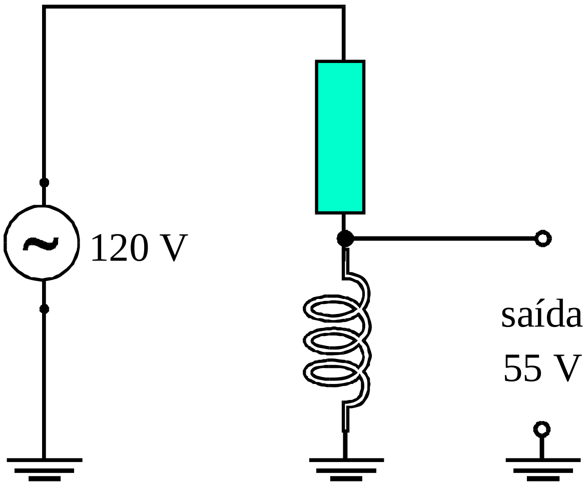
$$\cos \varphi = \frac{V_R}{V_T} \qquad \cos \varphi = \frac{107 \text{ V}}{120 \text{ V}} \qquad \cos \varphi = 0{,}89 \qquad \varphi = 27°$$

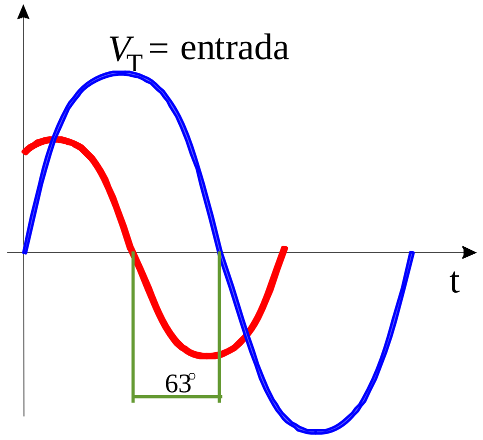
Como $\varphi < 45°$, o circuito é predominantemente resistivo.

O ângulo entre V_L e V_T pode ser calculado da seguinte forma:

$$\alpha = 90° - 27° \qquad \alpha = 63°$$

Isto significa que a tensão de saída está 63° adiantada em relação à da entrada, como ilustrado na figura abaixo.





Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Desenhe o gráfico senoidal e fasorial completo de um circuito RL série em corrente alternada.

2. Como se determina o ângulo de defasagem entre as tensões V_R e V_L de um circuito RL série em corrente alternada ?

BIBLIOGRAFIA

DAWES, CHESTER L. **Curso de Eletrônica; corrente alternada**. A course in electrical engineering. Trad. de João Protásio Pereira da Costa. 18.ª ed., Porto Alegre, Globo, 1979, vol.4

DEGEM SYSTEMS. **Circuitos elétricos de CA**. Is rall, Eletrônica Modular Panter. c1976. 163p. ilust.

SENAI/DN. **Impedância**. Rio de Janeiro, Divisão de Ensino e Treinamento, 1980, 91p. (Módulo Instrucional: Eletricidade - Eletrotécnica, 18).

VAN VALKEMBURGO, NOOGER & NEVILLE. **Eletricidade Básica**. 5.ª ed., Rio de Janeiro, Freitas Bastos, 1960, vol.4. ilust.

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Educação Permanente – Torna-se um imperativo com o compromisso mútuo entre pessoas e entidade, em favor do crescimento pessoal, institucional e da sociedade.

Introdução

Este fascículo dá seqüência ao estudo dos circuitos reativos indutivos, tratando do circuito RL paralelo e suas características.

O fascículo foi desenvolvido visando a capacitá-lo a determinar os parâmetros do circuito RL paralelo em corrente alternada.

O estudo deve ser realizado com esse objetivo e deve procurar também evidenciar as diferenças em relação ao circuito RC paralelo.

Para ter sucesso no desenvolvimento do conteúdo e atividades deste fascículo, o leitor já deverá ter conhecimentos relativos a:

- Indutores em *ca*.
- Representação fasorial de parâmetros elétricos *ca*

Circuito RL paralelo em corrente alternada

Quando se conecta um circuito RL paralelo a uma rede de CA, o resistor e o indutor recebem a mesma tensão, como ilustrado na **Fig.1**. Por essa razão, a tensão é utilizada como referência para o estudo do circuito RL paralelo.

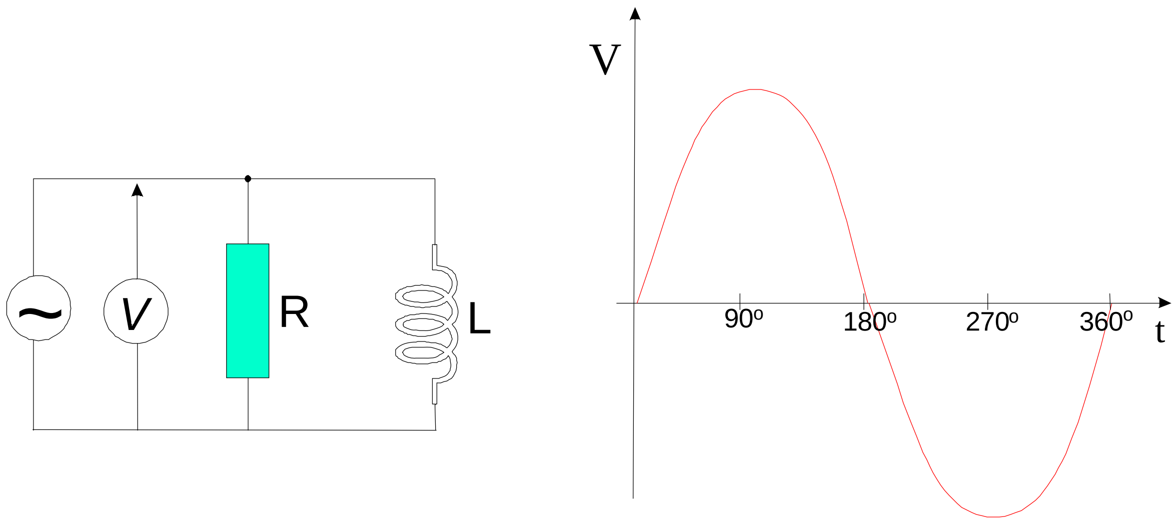


Fig.1 Circuito RL paralelo.

A tensão aplicada provoca a circulação de uma corrente no resistor (I_R) que está em fase com a tensão aplicada.

A tensão aplicada ao resistor também está aplicada ao indutor, provocando a circulação de uma corrente I_L. Esta corrente está atrasada 90º em relação à tensão aplicada, devido a auto-indução, como pode ser visto na **Fig.2**.

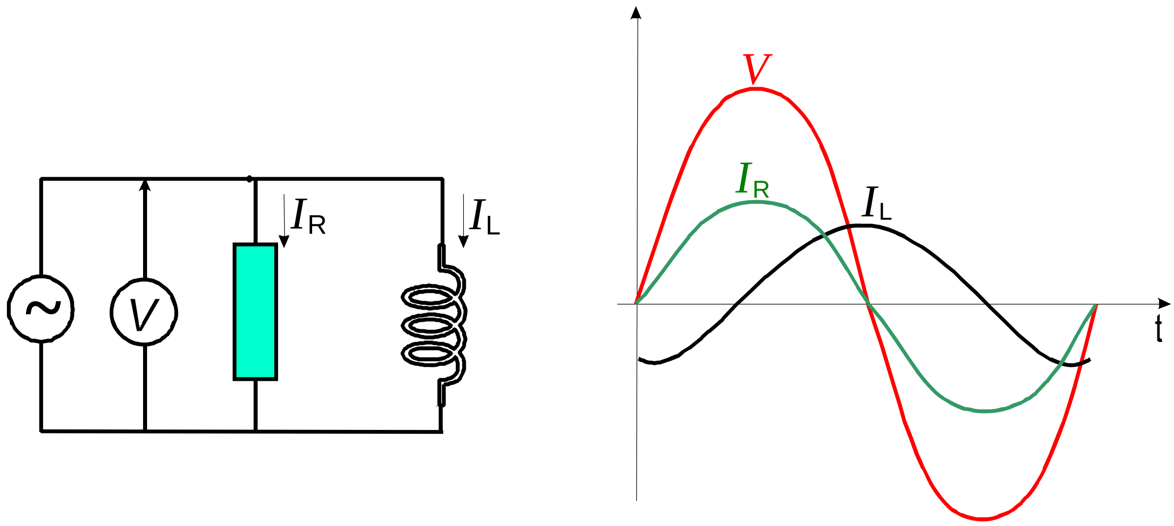


Fig.2 Defasagem entre I_R e I_L.

O gráfico senoidal mostra que o circuito RL paralelo se caracteriza por provocar uma defasagem entre as correntes. Esta defasagem é visualizada mais facilmente através do gráfico fasorial do circuito RL paralelo, como mostrado na **Fig.3**.

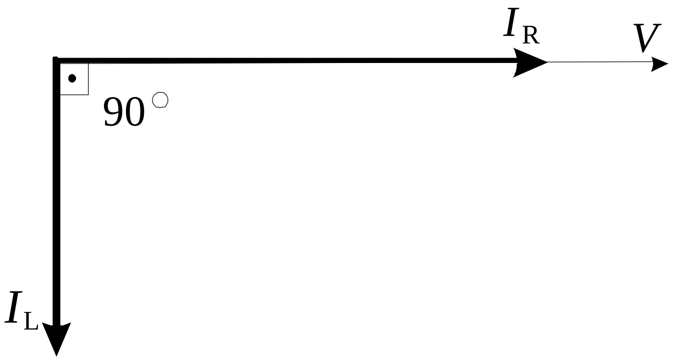


Fig.3 Representação fasorial dos circuitos RL paralelo.

O gráfico mostra que a corrente no resistor está adiantada 90º em relação à corrente no indutor.

As correntes no circuito RL paralelo

Em um circuito RL paralelo, existem três correntes a ser consideradas:

- A corrente no resistor I_R.
- A corrente no indutor I_L.
- A corrente total I_T.

A **Fig.4** mostra o posicionamento dos instrumentos para a medição dessas três correntes.

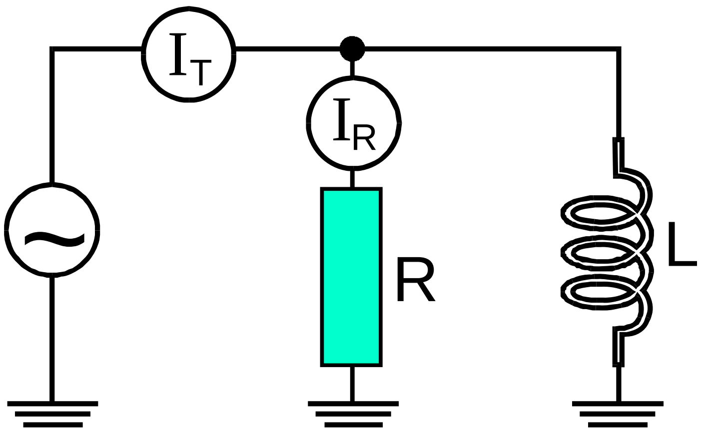


Fig.4 Medição das correntes em um circuito RL paralelo.

A corrente eficaz no resistor e no indutor é dada pela Lei Ohm:

$$I_R = \frac{V}{R} \qquad (1)$$

$$I_L = \frac{V}{X_L} \qquad (2)$$

A corrente total é obtida por soma vetorial, uma vez que as correntes I_R e I_L estão defasadas entre si, ou seja :

$$I_T = \sqrt{I_R^{\,2} + I_L^{\,2}} \tag{3}$$

Esta equação pode ser operada para isolar os termos I_R e I_L de modo que :

$$I_R = \sqrt{I_T^{\,2} - I_L^{\,2}} \tag{4}$$

$$I_L = \sqrt{I_T^{\,2} - I_R^{\,2}} \tag{5}$$

IMPEDÂNCIA DO CIRCUITO RL PARALELO

A impedância Z de um circuito RL paralelo é a oposição total que este circuito apresenta à circulação da corrente e pode ser determinada através da Lei de Ohm se os valores de tensão (V) e corrente total (I_T) forem conhecidos.

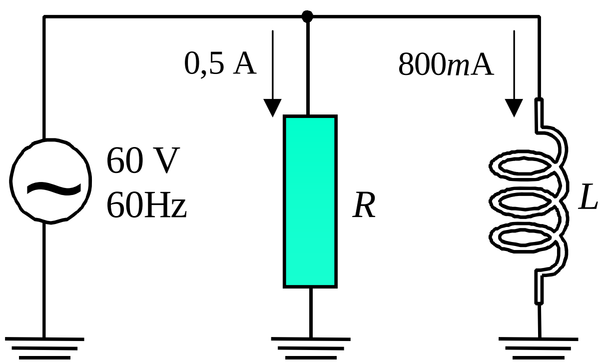
$$Z = \frac{V}{I_T} \tag{6}$$

Na **Eq. (6)** o valor de Z está em ohms, V em volts e I_T em ampères.

A seguir são apresentados dois exemplos ilustrativos para circuitos RL série.

<u>Exemplo 1</u>:

Determinar I_T, R, Z e L no circuito da figura abaixo.



Solução:

Determinação de I_T e R

$I_T = \sqrt{I_R{}^2 + I_L{}^2} = \sqrt{0{,}5^2 + 0{,}8^2}$ $\qquad I_T = 0{,}94A$

$R = \frac{V}{I_R} = \frac{60}{0{,}5}$ $\qquad R = 120\Omega$

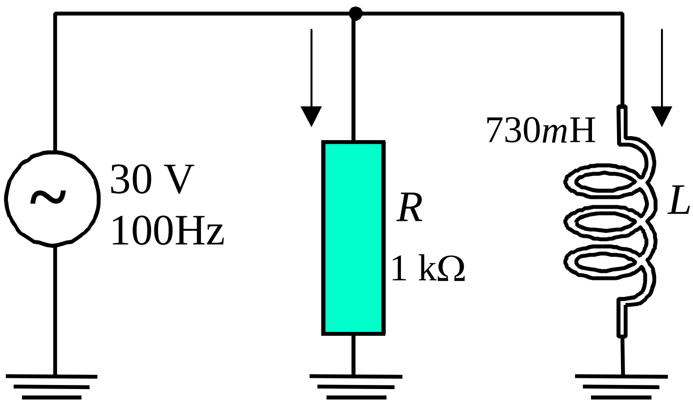
Determinação de Z e L

$Z = \frac{V}{I_T} = \frac{60}{0{,}94}$ $\qquad Z = 64\Omega$

$L = \frac{X_L}{2\pi \times f} = \frac{75}{6{,}28 \times 60}$ $\qquad L = 199$ mH

Exemplo 2:

Determinar I_R, I_L, I_T e Z no circuito da figura abaixo.



Solução:

Determinação de I_R e I_C

$I_R = \frac{V}{R} = \frac{30}{1000}$ $\qquad I_R = 30\ mA$

$X_L = 2\pi \times f \times L = 6{,}28 \times 100 \times 0{,}73$ $\qquad X_L = 458\ \Omega$

$I_L = \frac{V}{X_L} = \frac{30}{458}$ $\qquad I_L = 65{,}5\ mA$

Determinação de I_T e Z

$$I_T = \sqrt{I_R^{\,2} + I_L^{\,2}} = \sqrt{0{,}03^2 + 0{,}0655^2} \qquad I_T = 72 \text{ mA}$$

$$Z = \frac{V}{I_T} = \frac{30}{0{,}072} \qquad Z = 417\ \Omega$$

Defasagem entre as correntes

As três correntes que circulam em um circuito RL paralelo estão defasadas entre si. As defasagens entre I_R e I_T e entre I_L e I_T podem ser determinadas se as três correntes puderem ser medidas ou determinadas.

O ângulo (φ) entre I_R e I_T pode ser determinado a partir da relação cosseno:

$$\cos\varphi = \frac{I_R}{I_T}$$

$$\varphi = arc\cos\frac{I_R}{I_T} \qquad (7)$$

O valor numérico do ângulo pode ser encontrado consultando uma tabela de cossenos ou usando uma calculadora.

Conhecido o ângulo φ entre I_R e I_T, o ângulo α entre I_L e I_T pode ser facilmente determinado.

$$\alpha = 90^o - \varphi \qquad (8)$$

Quando a corrente I_R é maior que I_L, o ângulo φ é menor que 45º e o circuito é predominantemente resistivo.

Se $I_R > I_L$, então $\varphi < 45°$ (circuito predominantemente resistivo).

Quando, por outro lado, a corrente I_L é maior que a corrente I_R, o ângulo φ é maior que 45° e o circuito é predominantemente indutivo.

Se $I_L > I_R$, então $\varphi > 45°$ (circuito predominantemente indutivo).

A seguir são apresentados dois exemplos de determinação dos ângulos de defasagem entre as correntes.

Exemplo 3:

Determinar o ângulo φ entre I_R e I_T e o ângulo α entre I_L e I_T do circuito da figura abaixo.

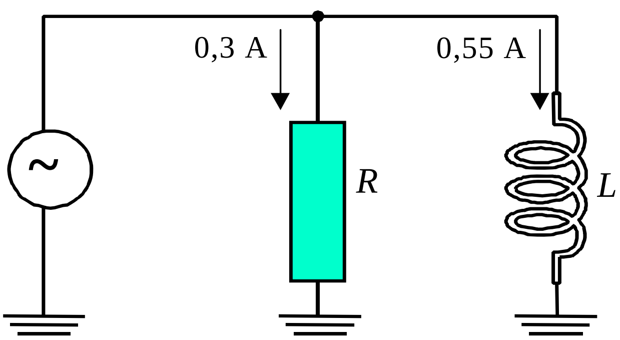
Solução:

$$I_T = \sqrt{I_R^{\,2} + I_L^{\,2}} = \sqrt{0{,}3^2 + 0{,}55^2}$$

$I_T = 0{,}626$ A

$$\varphi = arc\cos \frac{I_R}{I_T} = arc\cos \frac{0{,}3}{0{,}626}$$

$$\varphi = arc\cos 0{,}479$$



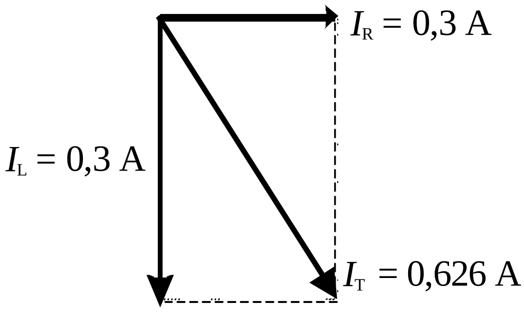
Consultando-se uma tabela de cossenos ou usando-se uma calculadora, encontra-se:

$$\varphi = 61°$$

O ângulo entre I_L e I_T pode ser determinado da seguinte forma:

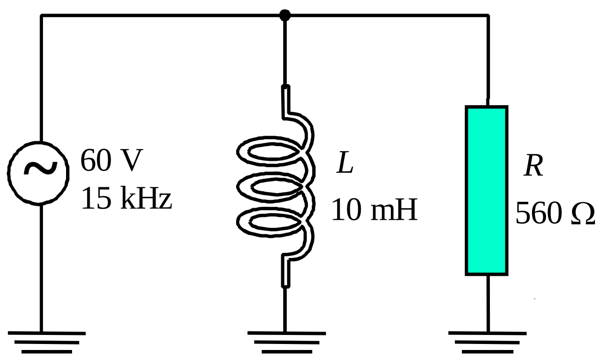
$\alpha = 90° - \varphi$ $\qquad$ $\alpha = 90° - 61°$ $\qquad$ $\alpha = 29°$

A figura abaixo mostra o gráfico vetorial do circuito que é predominantemente indutivo.



Exemplo 4:

Determinar a defasagem entre I_R e I_T (φ) e entre I_L e I_T (α) do circuito da figura abaixo.



Solução:

$$I_R = \frac{V}{R} = \frac{60}{560}$$

$I_R = 0{,}107A$

$X_L = 2\pi \times f \times L = 6{,}28 \times 15.000 \times 0{,}01$

$X_L = 942\ \Omega$

$$I_T = \sqrt{I_R^{\,2} + I_L^{\,2}} = \sqrt{0{,}107^2 + 0{,}064^2}$$

$I_T = 0{,}125A$

$$\varphi = arc\cos\frac{I_R}{I_T} = arc\cos\frac{0{,}107}{0{,}125}$$

$\varphi = arc\cos 0{,}856$

$\varphi = 31°$

O ângulo entre I_L e I_T pode ser calculado da seguinte forma:

$\alpha = 90° - \varphi$ $\qquad$ $\alpha = 90° - 31°$ $\qquad$ $\alpha = 59°$

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Esboce o diagrama fasorial do circuito RL paralelo

2. Qual a condição para que um circuito RL paralelo em CA seja dito prodominantemente resistivo?

BIBLIOGRAFIA

DAWES, CHESTER L. **Curso de Eletrotécnica**; Corrente alternada. A course in Electrical Engineering - Trad. de João Protásio Pereira da Costa. 18ª. ed., Porto Alegre, Globo, 1979, vol.4

MARCUS, ABRAHAM. **Eletricidade Básica**. Trad. de Ernest Muhr. São Paulo, Importadora de Livros, c 1964, 194p. ilust.

VAN VALKENBUR NOOGER & NEVILLE. Eletricidade Básica. 5ª.ed., Rio de Janeiro, Freitas Bastos, 1960, vol.4. ilust.

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Adequar a formação profissional que ministra em suas diversas modalidades, notadamente a aprendizagem, às novas demandas do desenvolvimento da indústria e das demais empresas de categoria econômicas sob sua jurisdição, é uma diretriz do *SENAI*.

Introdução

A medição de capacitância e principalmente a medição de indutância representam uma dificuldade. Essas grandezas não podem ser medidas diretamente, e, quando se faz necessário, utiliza-se um método indireto ou de comparação.

Este fascículo, que tratará da ponte balanceada em corrente alternada visa a levar ao leitor o conhecimento do princípio de funcionamento dos circuitos que realizam a medição de capacitâncias e indutâncias por comparação.

Para ter sucesso no desenvolvimento do conteúdo e atividades deste fascículos, o leitor já deverá ter conhecimentos relativos a:

- Circuitos de ponte balanceada em corrente contínua.
- Circuitos RC e RL série.

Ponte balanceada em CA

O circuito de ponte balanceada, quando alimentado por CC, é utilizado para a determinação de resistências pelo método da comparação. A **Fig.1** ilustra esse princípio.

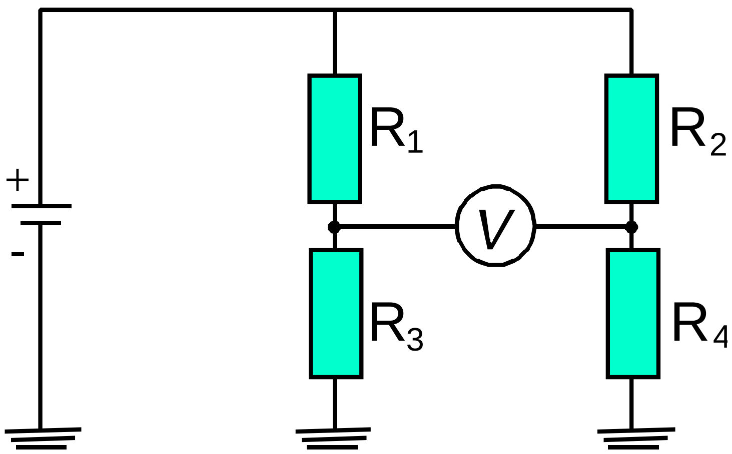


Fig.1 Ponte balanceada em CC.

O mesmo circuito de ponte balanceada, quando alimentado por CA pode ser utilizado para a determinação de resistências, indutâncias e capacitâncias por comparação.

Por essa razão, as pontes balanceadas alimentadas por CA são também conhecidas pelas denominações "Ponte RLC" e "Ponte Universal".

As pontes balanceadas em CA servem para a medição de capacitâncias e indutâncias por comparação.

A medição de capacitâncias e indutâncias por comparação através de pontes balanceadas é muito utilizada porque permite uma boa precisão nos valores medidos.

O CIRCUITO DA PONTE BALANCEADA

O circuito da ponte balanceada em CA é muito semelhante ao circuito ponte em CC, como mostrado na **Fig.2**.

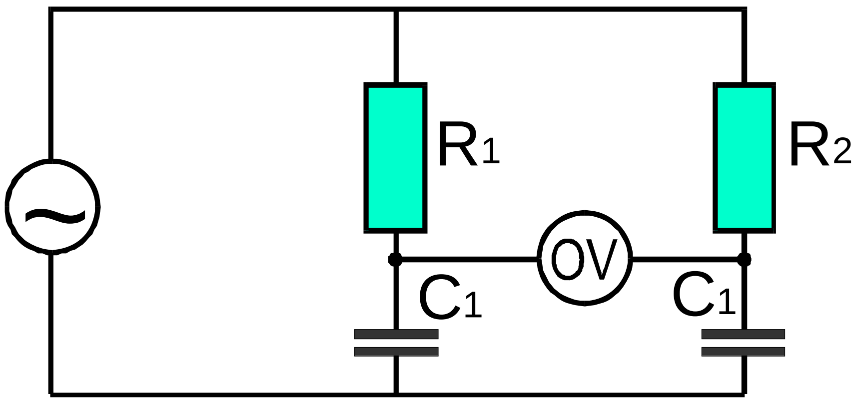


Fig.2 Ponte balanceada em CA.

O princípio de funcionamento da ponte balanceada em CA é o mesmo da ponte em cc, ou seja, comparar uma reatância de um componente desconhecido com a reatância conhecida de um componente padrão, como ilustrado na **Fig.3**.

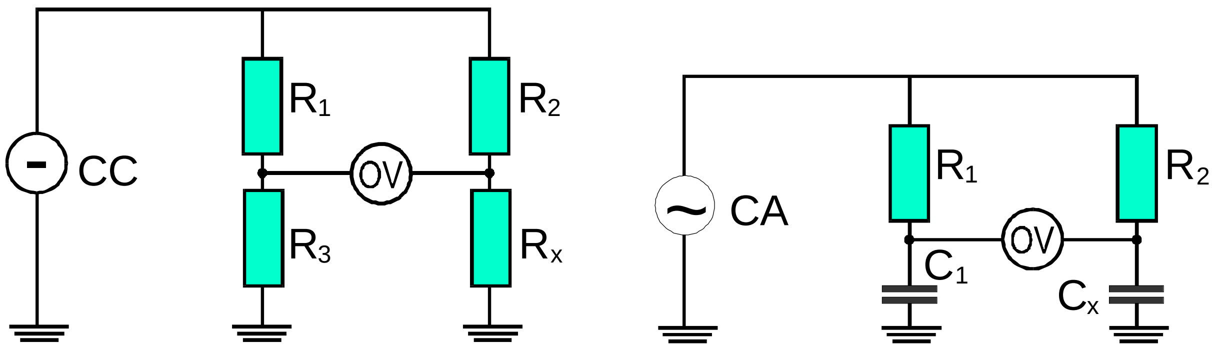


Fig.3 Princípio de funcionamento da ponte balanceada em CA.

O equilíbrio entre os dois ramais da ponte pode ser obtido utilizando-se um componente de valor variável em um dos ramais.

Como é difícil obterem-se capacitores e principalmente indutores variáveis, normalmente utiliza-se um potenciômetro em um dos ramais, como pode ser visto na **Fig.4**.

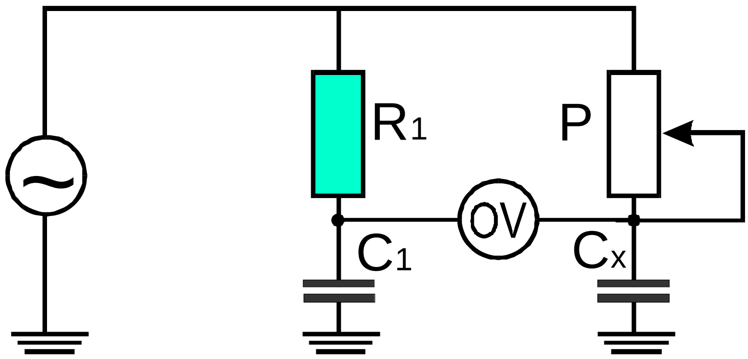


Fig.4 Função do potenciômetro na ponte CA balanceada.

A partir do momento em que o equilíbrio da ponte é obtido, é determinada a reatância do componente desconhecido. Conhecendo-se a reatância, o valor do componente pode então ser determinado.

Capacitor

$$X_C = \frac{10^6}{2\pi \times f \times C(\mu F)}$$

$$C(\mu F) = \frac{10^6}{2\pi \times f \times X_C}$$

Indutor

$$X_L = 2\pi \times f \times L$$

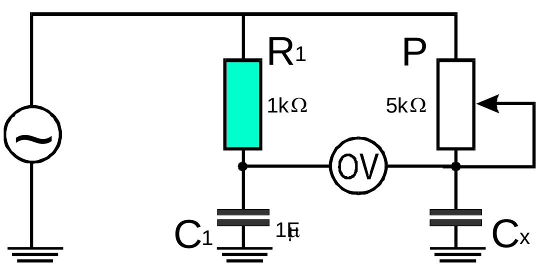
$$L = \frac{X_L}{2\pi \times f}$$

É importante observar que é necessário conhecer a freqüência de funcionamento da ponte, sem o que é impossível determinar o valor dos componentes.

Exemplo 1:

Determinar a capacitância C_x através da ponte da figura abaixo.

A freqüência da ponte é 1kHz e o equilíbrio foi obtido quando o potenciômetro foi ajustado para 2100Ω.



Solução:

$$\frac{R_1}{X_{C_1}} = \frac{P}{X_{C_X}} \qquad X_{C_X} = \frac{PX_{C_1}}{R_1}$$

$$X_{C_X} = \frac{2.100 \times 159}{1.000} \qquad X_{C_X} = 334\,\Omega\ (\text{em } 1\text{kHz})$$

$$C_X(\text{F}) = \frac{10^6}{2\pi \times f \times X_{C_X}}$$

$$C_X(\text{F}) = \frac{10^6}{6{,}28 \times 1.000 \times 334} \qquad C_X = 0{,}476\ \mu\text{F}$$

PONTES DE MEDIÇÃO COMERCIAIS

As pontes de medição de indutâncias e capacitâncias encontradas no comércio são equipamentos sofisticados com recursos diversos, permitindo uma grande precisão nos valores medidos.

Nesse tipo de pontes, o voltímetro entre os ramais é substituído por dispositivos que permitam maior sensibilidade e precisão, tais como fones ligados a amplificadores de áudio ou mesmo válvulas indicadoras.

Em geral, nas pontes RLC comerciais não é necessário realizar muitos cálculos. A razão entre o valor do componente desconhecido (L_X ou C_X) e do componente padrão ($L_{padrão}$ ou $C_{padrão}$) é dado diretamente em um dial, como mostrado na **Fig.5**.

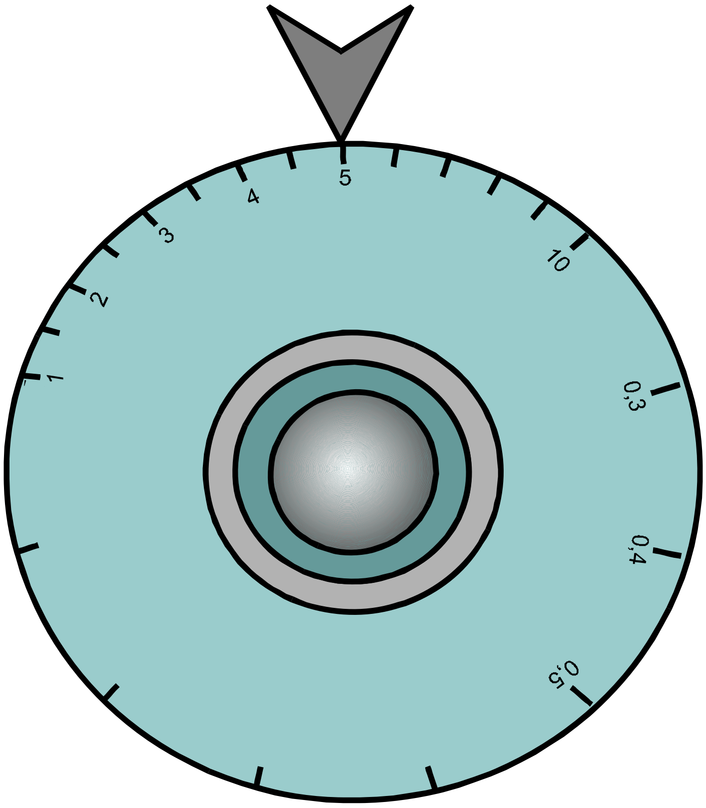


Fig.5 Dial para leitura de indutâncias e capacitâncias.

Exemplo 2:

Supondo-se no exemplo da **Fig.5**, que o indutor padrão fosse de 100mH, qual a indutância do indutor desconhecido ?

Solução:

$$L_X = L_{padrão} \times 5$$

$$L_X = 100 \times 5$$

$$L_X = 500 \text{ mH}$$

Deve-se tomar o cuidado de usar componentes de baixa tolerância (de precisão) como componente padrão nas pontes para que a correção do valor encontrado não seja afetada.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Qual a finalidade da ponte balanceada em CA?

2. De que formas pode-se determinar indutâncias e capacitâncias desconhecidas?

BIBLIOGRAFIA

SENAI/DN. **Reparador de Circuitos Eletrônicos**; Eletrônica Básica I. Rio de Janeiro, (Coleção Básica SENAI. Módulo 1).

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Integração – Fortalecer o trabalho em equipe é essencial para a consecução dos objetivos e satisfação dos clientes externos e internos.

Introdução

Os aparelhos de som produzidos atualmente dispõem de muitos recursos e são ligados a caixas de som de alta qualidade, de forma que os sons graves são reproduzidos em um alto-falante e os agudos em outro.

Como é que esta separação entre graves e agudos acontece? Certamente esta pergunta já foi feita inúmeras vezes.

A resposta a essa pergunta está nos circuitos compostos por resistores, capacitores e indutores, denominados de circuitos RLC.

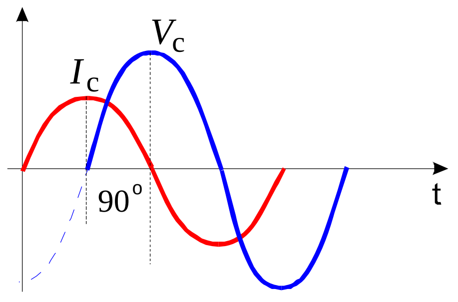
Este fascículo tratará do circuito RLC série e suas características, visando a fornecer os fundamentos indispensáveis para que seja possível compreender fenômenos como a "separação de graves e agudos".

Para ter sucesso no desenvolvimento do conteúdo e atividades deste fascículo, o leitor já deverá ter conhecimentos relativos a:

- Indutores.
- Capacitores.
- Representação fasorial de parâmetros elétricos.

O circuito RLC série em corrente alternada

Um capacitor ligado em corrente alternada provoca a defasagem entre a corrente e a tensão. A tensão é atrasada 90º em relação à corrente, como ilustrado na **Fig.1**.



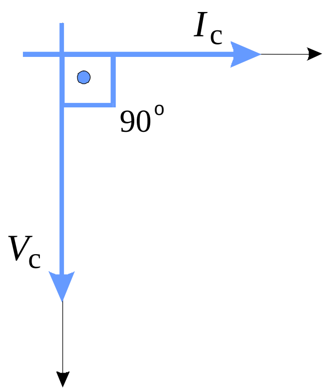
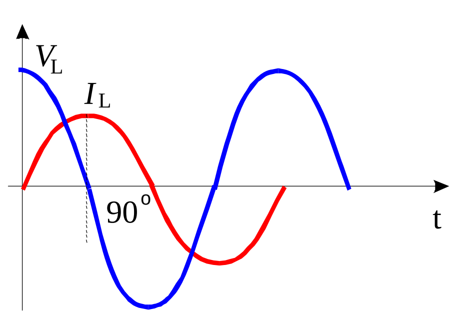


Fig.1 Defasagem entre corrente e tensão provocada por um capacitor.

Um indutor ligado em CA também provoca uma defasagem entre tensão e corrente. A tensão é adiantada 90º em relação a corrente, como mostrado na **Fig.2**.



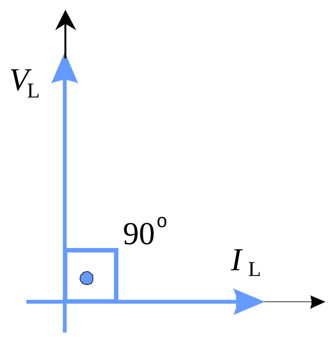


Fig.2 Defasagem entre corrente e tensão provocada por um indutor.

Comparando os gráficos fasoriais do capacitor e do indutor, verifica-se que os efeitos são simétricos entre si. Em relação à corrente, o capacitor atrasa a tensão e o indutor adianta.

Esta oposição entre os efeitos faz com que os circuitos formados por um resistor, um indutor e um capacitor ligados em série tenham um comportamento particular em CA.

Este comportamento pode ser estudado tomando-se como referência o circuito RLC série mostrado na **Fig.3**.

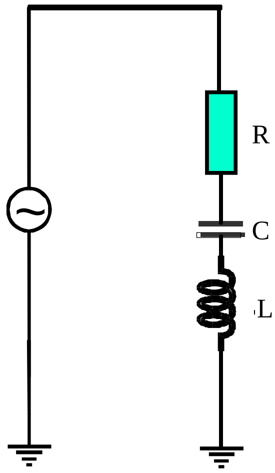


Fig.3 Circuito RLC série.

Como o circuito é série, a corrente elétrica é tomada como referência, por ser única em todo o circuito.

A corrente circulante provoca uma queda de tensão no resistor ($V_R = I \times R$) que está em fase com a corrente, como ilustrado na **Fig.4**.

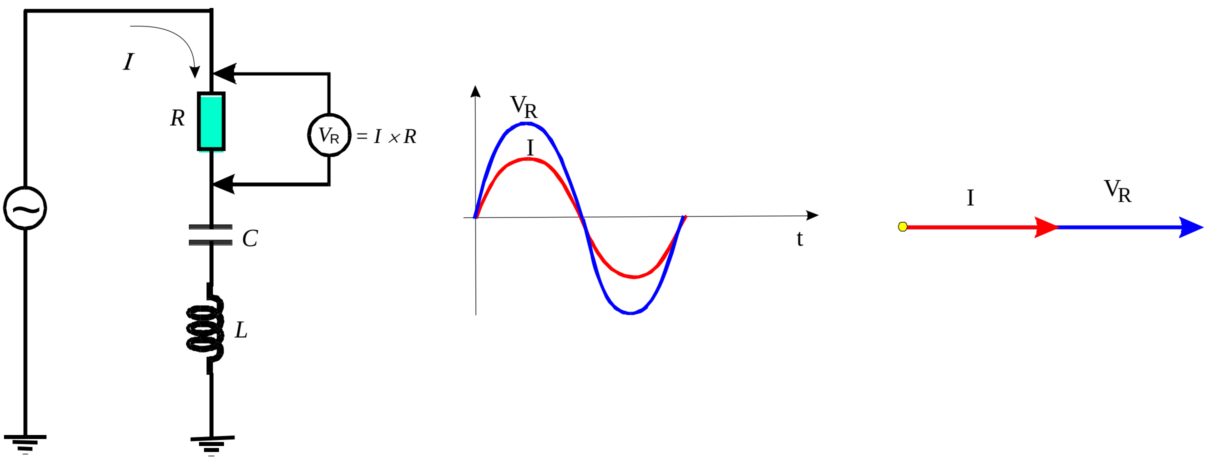


Fig.4 Queda de tensão em R.

A corrente provoca também uma queda de tensão no indutor ($V_L = I \times X_L$). A queda de tensão no indutor está 90º **adiantada** em relação à corrente, como ilustrado na **Fig.5**.

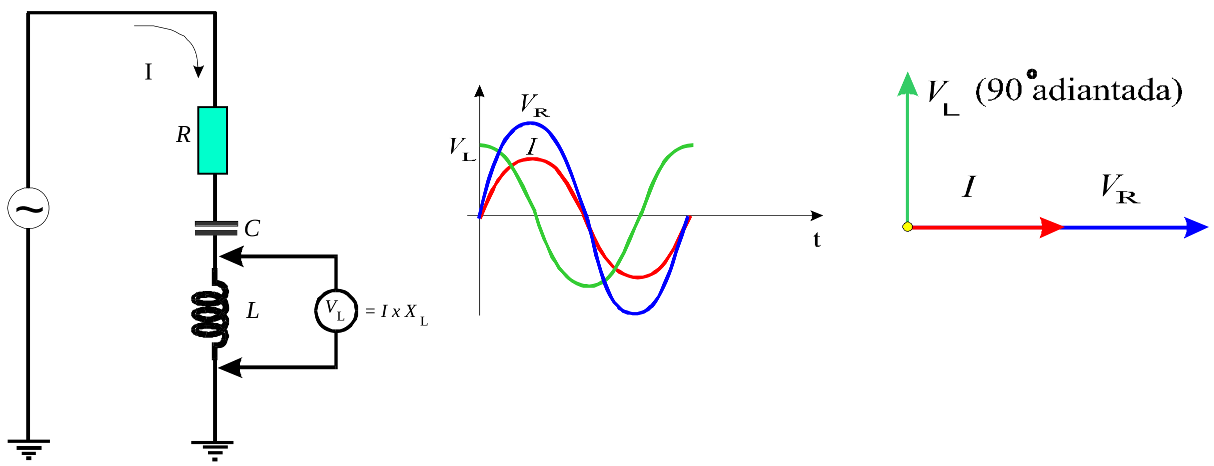


Fig.5 Queda de tensão no indutor.

Da mesma forma, ocorre uma queda de tensão no capacitor ($V_C = I \times X_C$). A queda de tensão no capacitor está 90º **atrasada** em relação à corrente, como pode ser visto na **Fig.6**.

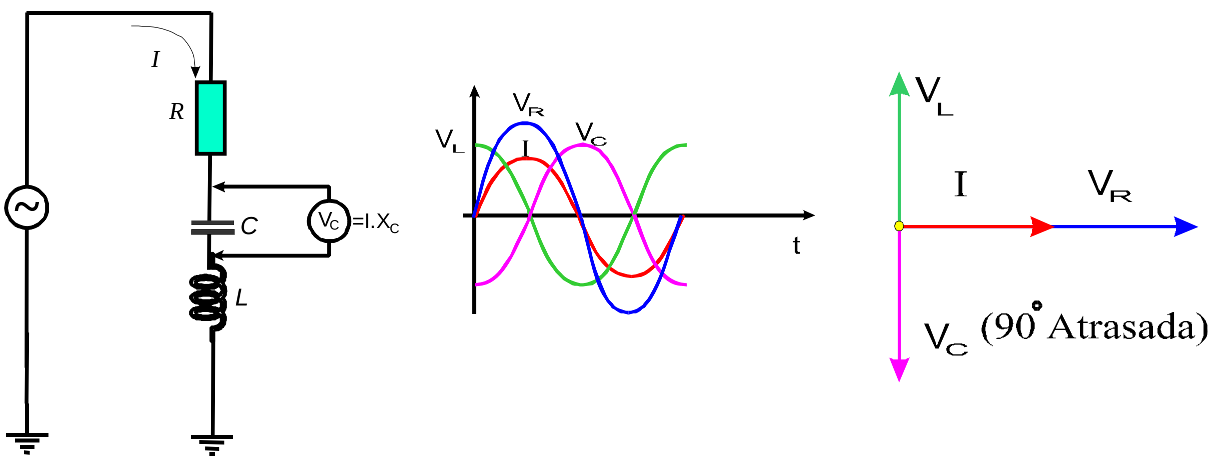


Fig.6 Queda de tensão no capacitor.

As tensões no circuito RLC série

No circuito RLC série existe uma única corrente (I) e três tensões envolvidas (V_R, V_L e V_C), conforme mostram os gráficos senoidal e fasorial da **Fig.7**.

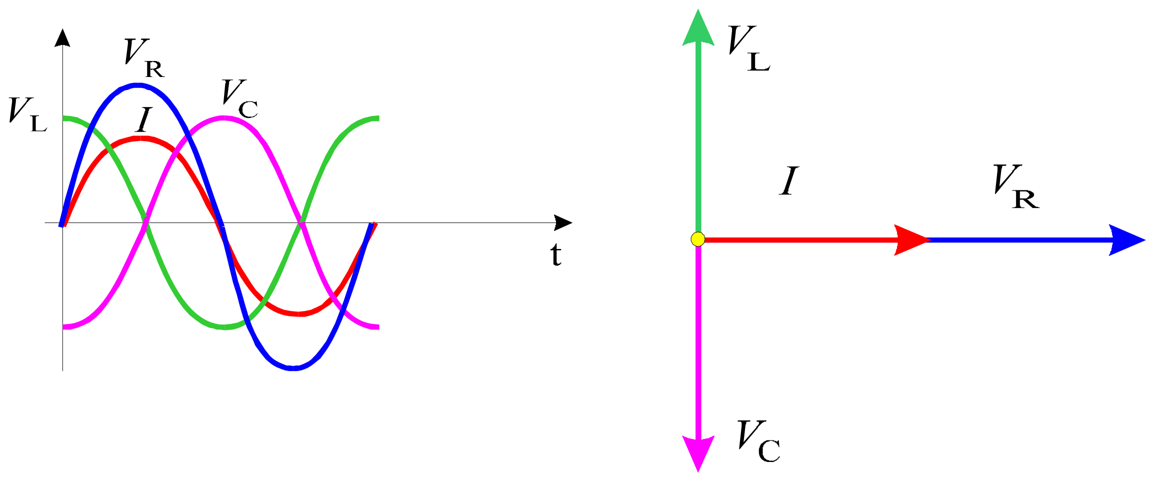


Fig.7 Gráficos senoidal e fasorial dos circuitos RLC série.

Desses gráficos, observa-se que a tensão no indutor e no capacitor estão em oposição de fases.

Retirando dos gráficos a corrente e a queda de tensão no resistor, pode-se ver claramente na **Fig.8** que V_L e V_C estão em oposição de fases.

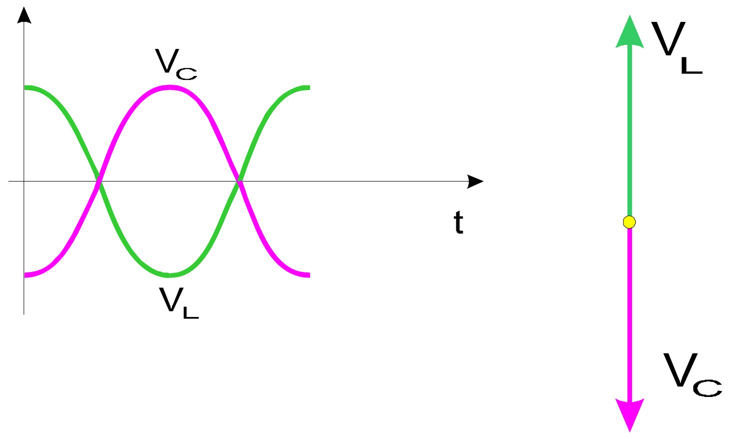


Fig.8 Queda de tensão no indutor e queda de tensão no capacitor em oposição de fases.

As tensões V_L e V_C em oposição de fase atuam uma contra a outra, subtraindo-se. Esta subtração entre V_L e V_C pode ser observada na prática, medindo-se os valores de V_C e V_L isoladamente e depois medindo-se o valor $V_C – V_L$, como ilustrado na **Fig.9**.

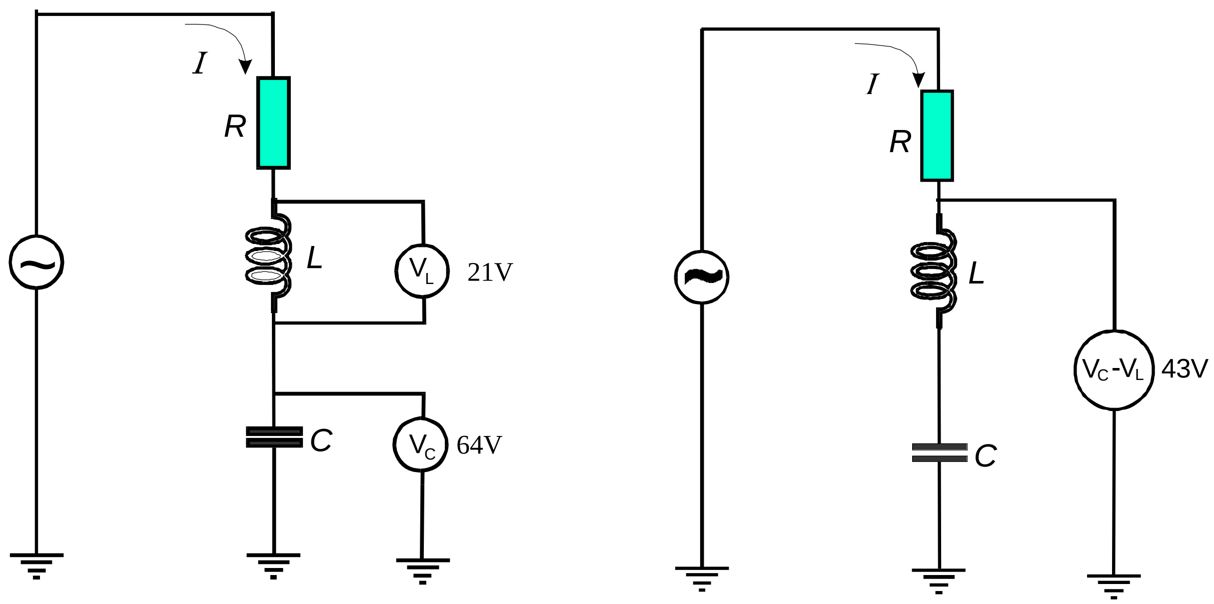
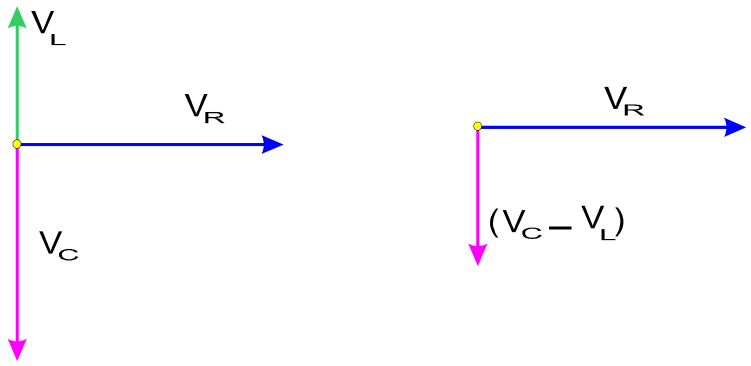


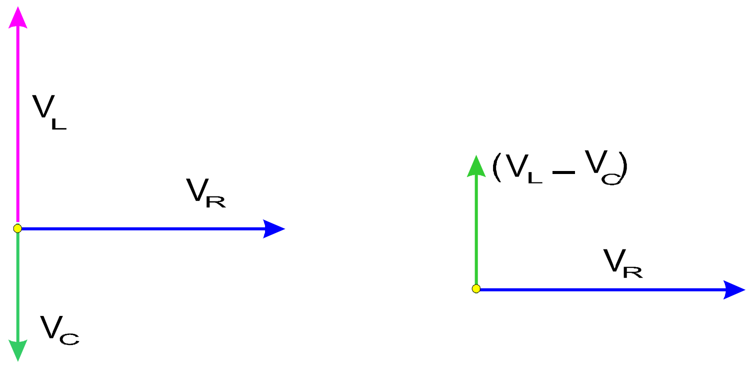
Fig.9 Tensão resultante V_C - V_L

Na **Fig.9,** a tensão resultante entre L e C é capacitiva porque a tensão V_C é maior que a tensão V_L.

Com base na subtração entre V_L e V_C, o sistema de três fasores (V_R, V_L e V_C) pode ser reduzido para dois fasores : (V_C – V_L) e V_R ou (V_L – V_C) e V_R. Esse comportamento pode ser visto nas **Fig.10**.



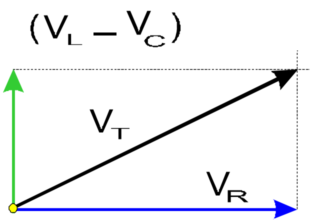
(a)



(b)

Fig.10 (a) Circuito RLC onde o efeito capacitivo é maior que o indutivo e (b) circuito RLC onde o efeito indutivo é maior que o capacitivo.

A partir do sistema de dois fasores defasados entre si de 90º, a tensão total V_T pode ser determinada pelo Teorema de Pitágoras.



$$V_T{}^2 = V_R{}^2 + (V_L - V_C)^2$$

$$V_T = \sqrt{V_R{}^2 + (V_L - V_C)^2} \qquad (1)$$

Note que nesta equação, os termos V_L e V_C devem ser colocados sempre na ordem: maior menos o menor (V_L – V_C ou V_C – V_L), de acordo com a situação. Isto é importante no momento em que for necessário isolar um dos termos (V_L ou V_C) na equação.

A seguir são mostrados dois exemplos de utilização da equação de tensão total.

Exemplo 1:

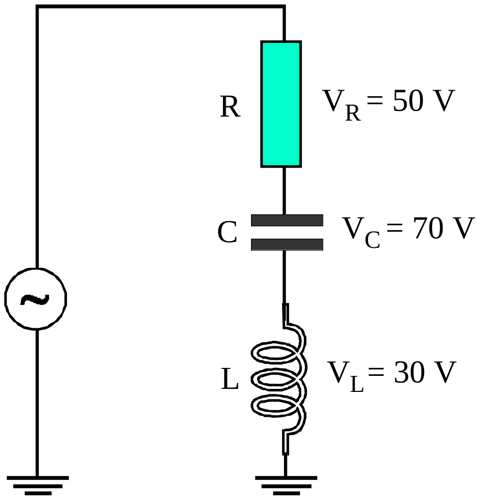
Determinar a tensão total aplicada ao circuito da figura abaixo.

Solução:

$$V_T^2 = V_R^2 + (V_L - V_C)^2$$

$$V_T = \sqrt{50^2 + (70-30)^2}$$

$$V_T = 64V$$



Exemplo 2:

Determinar o valor da queda de tensão no resistor.

Solução:

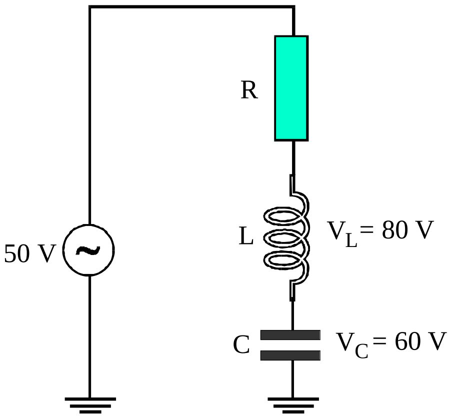
$$V_T^2 = V_R^2 + (V_L - V_C)^2$$

$$V_T^2 - (V_L - V_C)^2 = V_R^2$$

$$V_R = \sqrt{V_T^2 - (V_L - V_C)^2}$$

$$V_R = \sqrt{50^2 - 20^2}$$

$$V_R = 45{,}8V$$



Observe que $(V_L - V_C)$ foi tratado com um único termo para o dimensionamento da equação.

Impedância do circuito RLC série

A equação para determinar a impedância de um circuito RLC série pode ser encontrada a partir de um estudo do seu diagrama fasorial.

Dividindo-se cada um dos fasores V_L , V_R e V_C pela corrente I, tem-se :

$$X_L = \frac{V_L}{I} \qquad R = \frac{V_R}{I} \qquad X_C = \frac{V_C}{I}$$

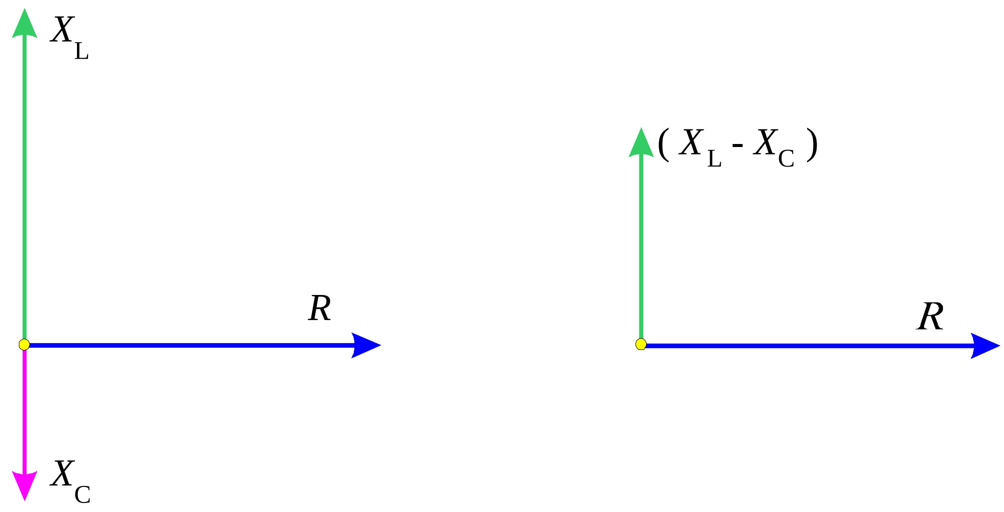
Os valores X_L, R e X_C dão origem a um novo gráfico fasorial ilustrado na **Fig. 11**.



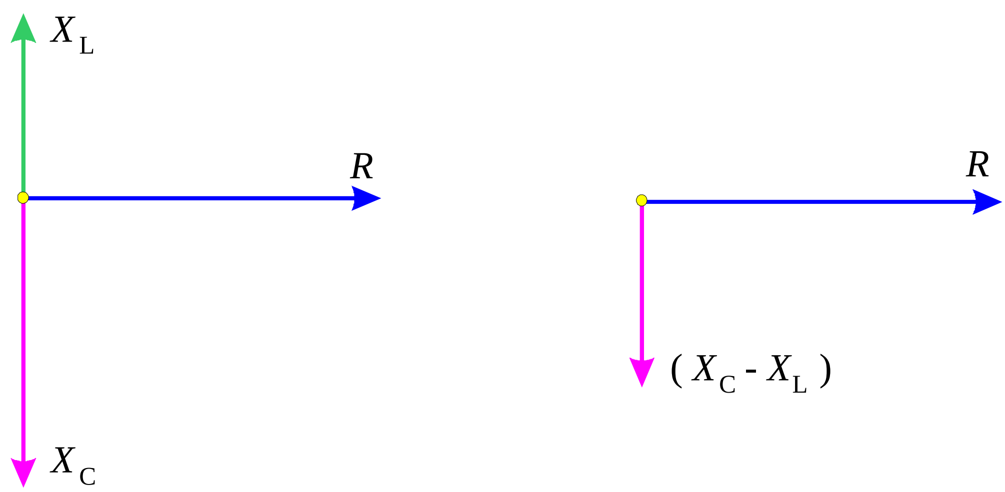
Fig.11 Diagrama fasorial de X_L, R e X_C

Pelo novo gráfico fasorial, observa-se que X_L e X_C estão em oposição de fase.

Com base nesta observação, o sistema de três fasores (X_L, R e X_c) pode ser reduzido apenas para dois, conforme ilustrado na **Fig.12**.



(a)



(b)

Fig.12 (a) Circuito RLC onde $X_L > X_C$ e (b) $X_C > X_L$

A partir do sistema de dois fasores defasados entre si de 90º, a resultante pode ser determinada pelo Teorema de Pitágoras :

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \qquad (2)$$

Nesta equação, os termos X_L e X_C devem ser colocados na ordem, maior menos o menor, conforme a situação ($X_L - X_C$ ou $X_C - X_L$).

A CORRENTE NO CIRCUITO RLC SÉRIE

A corrente no circuito RLC série depende da tensão aplicada e da impedância do circuito, conforme estabelece a Lei de Ohm para circuitos de corrente alternada:

$$I = \frac{V_T}{Z} \tag{3}$$

A seguir são mostrados dois exemplos que ilustram a utilização das equações da tensão total e da corrente no circuito RLC série.

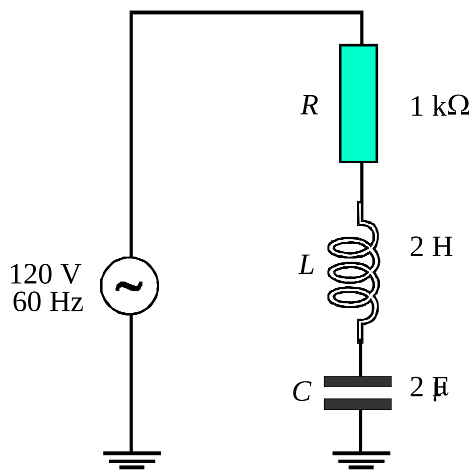
Exemplo 3:

Determinar Z, I, V_R, V_L *e* V_T no circuito da figura abaixo.

Solução:

$X_L = 2\pi \times f \times L \quad X_L = 6{,}28 \times 60 \times 2 \quad X_L = 754\Omega$

$$X_C = \frac{1}{2\pi \times f \times C} \qquad X_C = 1.327\Omega$$



$$Z = \sqrt{R^2 + (X_C - X_L)^2}$$

$$Z = \sqrt{1.000^2 + (1.327 - 754)^2}$$

$Z = 1.153\ \Omega$

$$I = \frac{V_T}{Z} \qquad I = \frac{120}{1.153} \qquad I = 0{,}104\text{A}$$

$V_R = I \times R \qquad V_R = 0{,}104 \times 1.000 \qquad V_R = 104\text{V}$

$V_L = I \times X_L \qquad V_L = 0{,}104 \times 754 \qquad V_L = 78\text{V}$

$V_C = I \times X_C \qquad V_C = 0{,}104 \times 1.327 \qquad V_C = 138\text{V}$

Os resultados podem ser conferidos aplicando-se os valores de V_R, V_L e V_T na **Eq.(1)** da tensão total :

$$V_T = \sqrt{V_R{}^2 + (V_C - V_L)^2} = \sqrt{104^2 + (138 - 78)^2}$$

$$V_T = 120{,}07V$$

O resultado confere com o valor da tensão aplicada, comprovando que os valores de V_R, V_L e V_C estão corretos. A pequena diferença (0,07V) se deve aos arredondamentos realizados nos cálculos.

Exemplo 4:

Determinar Z, I, V_R, V_L e V_C no circuito da figura abaixo.

Solução:

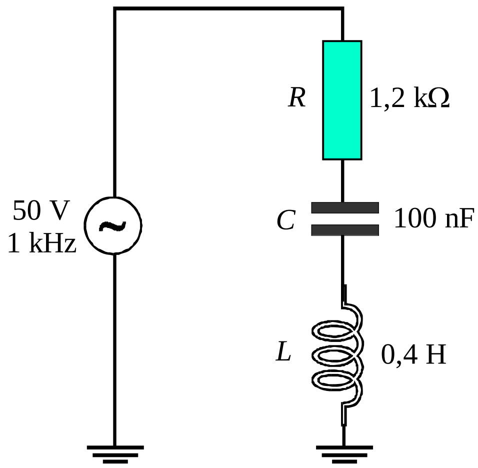
$$X_C = \frac{1}{2\pi \times f \times C} = 1.592\,\Omega$$

$$X_L = 2\pi \times f \times L = 2.512\Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

$$Z = \sqrt{1.200^2 + (2.512 - 1.592)^2}$$

$$Z = 1.512\Omega$$



$$I = \frac{V_T}{Z} \qquad I = \frac{50}{1.512} \qquad I = 0{,}0331A$$

$$V_R = I \times R \qquad V_R = 0{,}0331 \times 1.200 \qquad V_R = 39{,}7V$$

$$V_L = I \times X_L \qquad V_L = 0{,}0331 \times 2.512 \qquad V_L = 83{,}1V$$

$$V_C = I \times X_C \qquad V_C = 0{,}0331 \times 1.592 \qquad V_C = 52{,}7V$$

Os resultados podem ser comprovados solicitando-se os valores de V_R, V_L e V_T na **Eq.(1)** da tensão total.

Ressonância

A reatância de um indutor cresce à medida que a freqüência da rede CA aumenta. Por exemplo, para um indutor de 1H conectado a um gerador de sinais, tem-se a relação apresentada na **Tabela 1**.

Tabela 1 Relação entre freqüência do gerador e reatância de um indutor de 1H.

Freqüência do gerador	Reatância do indutor
500 Hz	3.140Ω
1000 Hz	6.280Ω
1500 Hz	9.420Ω
2000 Hz	12.560Ω

Colocando-se os dados em um gráfico, observa-se que a reatância de um indutor cresce linearmente com o aumento da freqüência, como ilustrado na **Fig.13**.

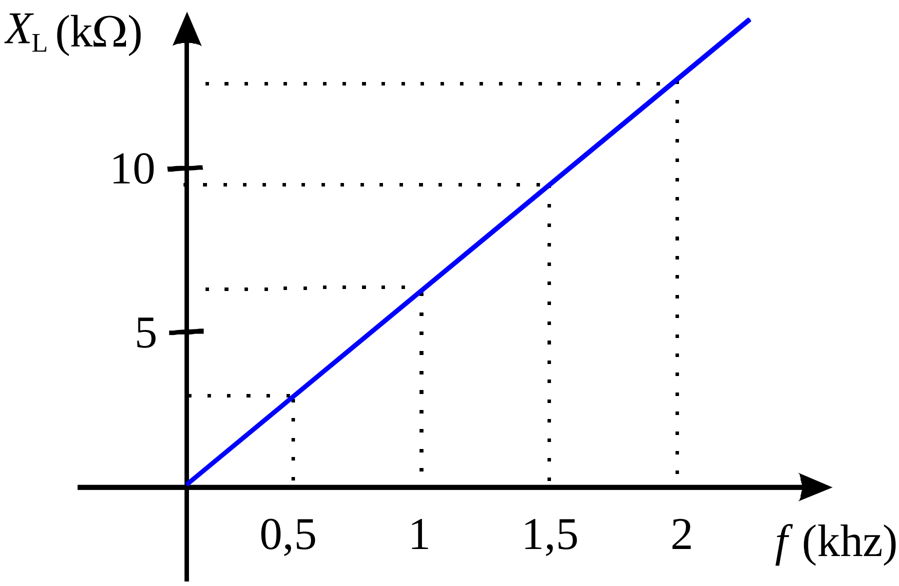


Fig.13 Reatância indutiva versus freqüência do gerador.

A reatância de um capacitor decresce com o aumento da freqüência do gerador de CA.

Por exemplo, para um capacitor de 0,02μF conectado a um gerador de sinais, tem-se a relação apresentada na **Tabela 2**.

Tabela 2 Relação entre a freqüência do gerador e reatância de um capacitor de 0,02μF.

Freqüência do gerador	Reatância do capacitor
500 Hz	15.923Ω
1.000 Hz	7.961Ω
1.500 Hz	5.307Ω
2.000 Hz	3.980Ω

A colocação dos valores num gráfico mostra a queda da reatância capacitiva com o aumento da freqüência, como ilustrado na **Fig.14**.

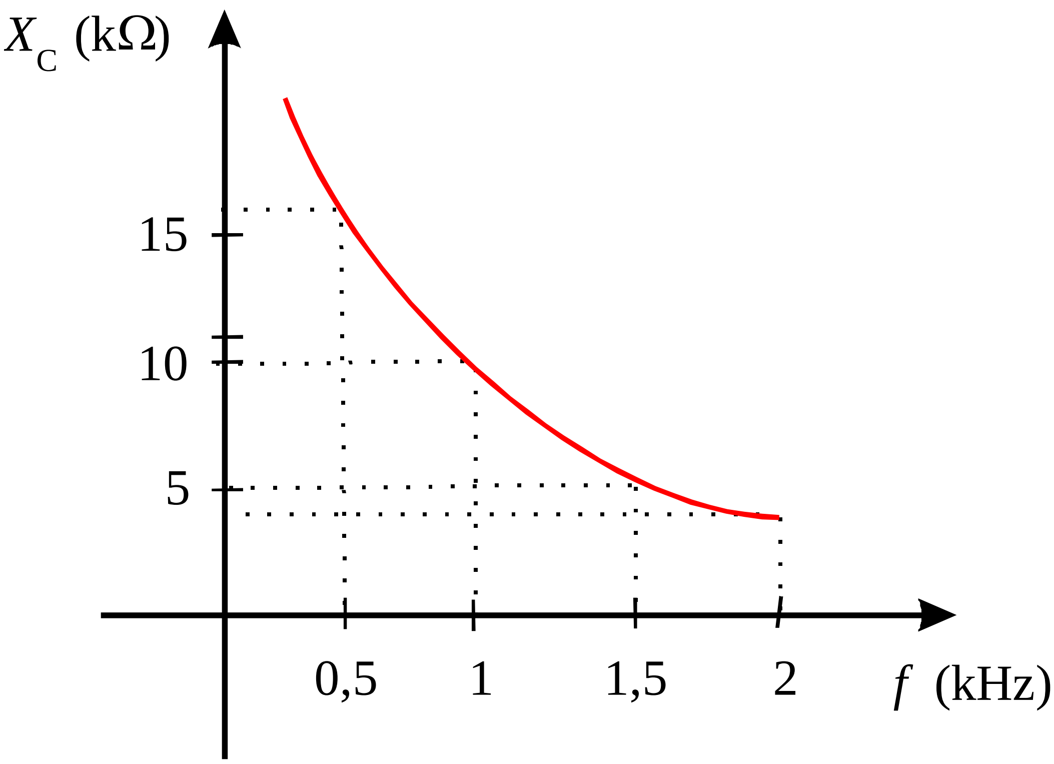


Fig.14 Reatância capacitiva versus freqüência do gerador.

Sobrepondo-se os gráficos da reatância capacitiva e reatância indutiva, verifica-se que existe uma determinada freqüência na qual X_L e X_C são iguais, como mostrado na **Fig.15**.

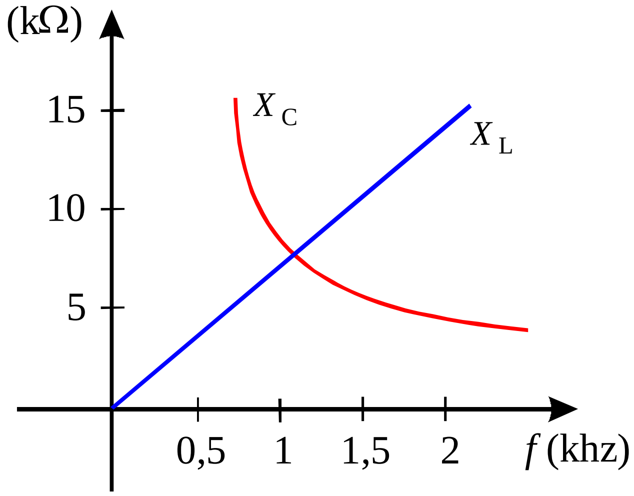


Fig.15 Freqüência para qual X_L e X_C são iguais.

Esta freqüência onde $X_L = X_C$, é determinada de **freqüência de ressonância**, representada pela notação f_R.

Freqüência de ressonância (f_R) é aquela em que X_C e X_L são iguais.

Qualquer circuito que contenha um capacitor e um indutor (em série ou em paralelo) tem uma freqüência de ressonância.

A equação para a determinação da freqüência de ressonância de um circuito LC pode ser deduzida a partir do fato de que $X_L = X_C$, ou seja :

$$2\pi \times f_R \times L = \frac{1}{2\pi \times f_R \times C}$$

Desenvolvendo-se a proporção, tem-se que:

$$f_R = \sqrt{\frac{1}{4\pi^2 \times L \times C}}$$

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \times C}} \quad (4)$$

onde

f_R = freqüência de ressonância em hertz
L = indutância em henry
C = capacitância em farad.

Note que se a capacitância for dada em μF, a freqüência de ressonância em Hz será calculada pela seguinte equação:

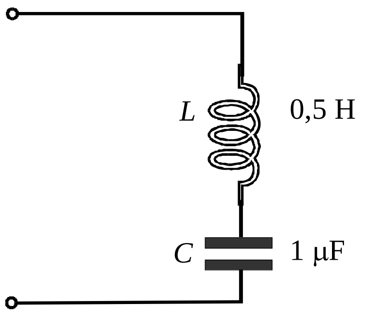
$$f_R = \frac{1.000}{2\pi\sqrt{L \times C}}$$

A seguir são apresentados dois exemplos de cálculo da freqüência de ressonância.

<u>Exemplo 5</u>:

Determinar a freqüência de ressonância do circuito da figura abaixo.

<u>Solução</u>:



$$f_R = \frac{1.000}{2\pi\sqrt{L \times C}} = \frac{1.000}{6{,}28\sqrt{0{,}5 \times 1}}$$

f_R = 225,22Hz

Pode-se conferir o resultado calculando-se os valores de X_L e X_C em 225,22Hz.

1μF em 225,22Hz	X_C = 707,02Ω
0,5H em 225,22Hz	X_L = 707,19Ω

A pequena diferença se deve aos arredondamentos realizados nos cálculos.

Exemplo 6:

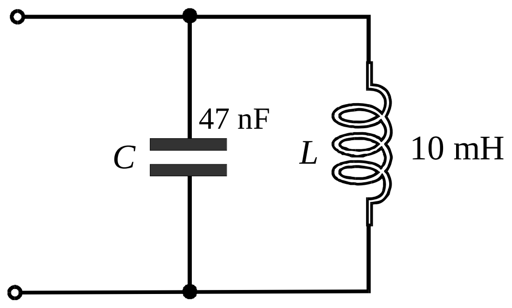
Determinar a freqüência de ressonância do circuito da figura abaixo.

Solução:

$$f_R = \frac{1.000}{2\pi\sqrt{L \times C}}$$

$$f_R = \frac{1.000}{6{,}28\sqrt{0{,}01 \times 0{,}047}}$$

f_R = 7.347,5Hz



Circuito RLC série na ressonância

O comportamento de um circuito RCL série na freqüência de ressonância pode ser estudado tomando-se como base um circuito RLC série qualquer ligado a uma fonte de CA. A **Fig.16** mostra um circuito RLC série.

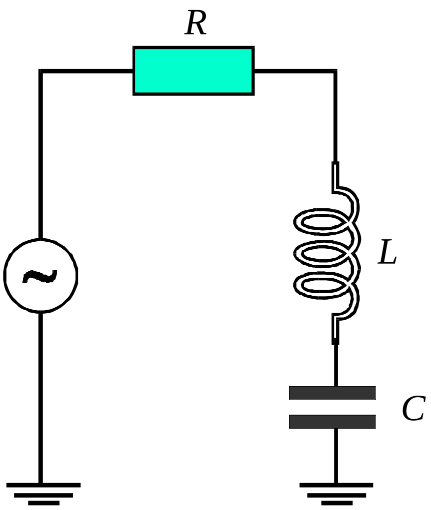


Fig.16 Circuito RLC série.

A impedância do circuito RLC série é dada pela **Eq.(2)** :

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

Se o gerador fornece uma CA na freqüência da ressonância, tem-se:

$$X_L = X_C$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2}$$

Portanto, em circuito RLC na freqüência de ressonância, Z = R.

A **Fig.17** mostra o gráfico do comportamento da impedância de um circuito RLC série em CA.

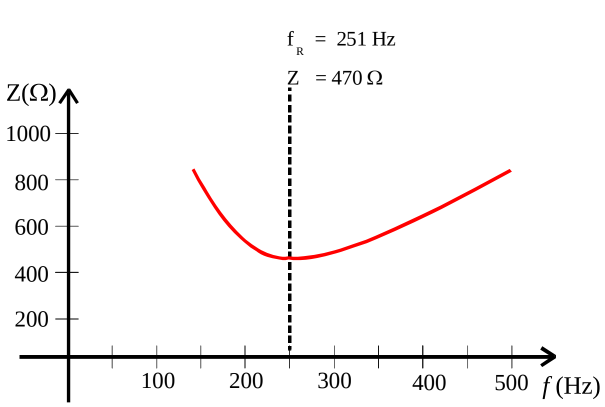


Fig.17 Impedância versus freqüência em circuito RLC série em CA.

O que se verifica é que na freqüência de ressonância, capacitor e indutor se anulam mutuamente, fazendo com que a impedância seja mínima e igual ao valor do resistor.

***Um circuito RLC série tem a impedância mínima na freqüência de ressonância*.**

Isto significa que na ressonância circula a corrente máxima em um circuito RLC série, conforme mostra o gráfico da **Fig.18**.

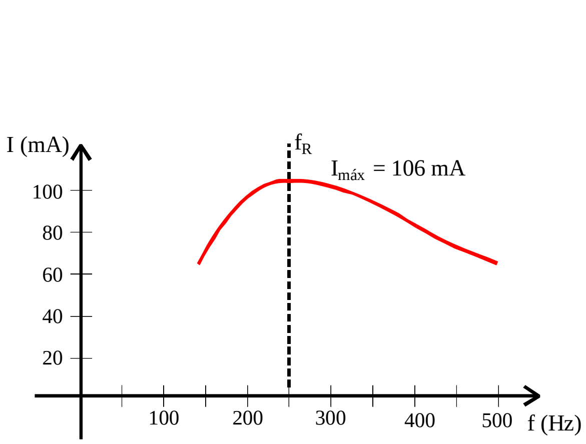


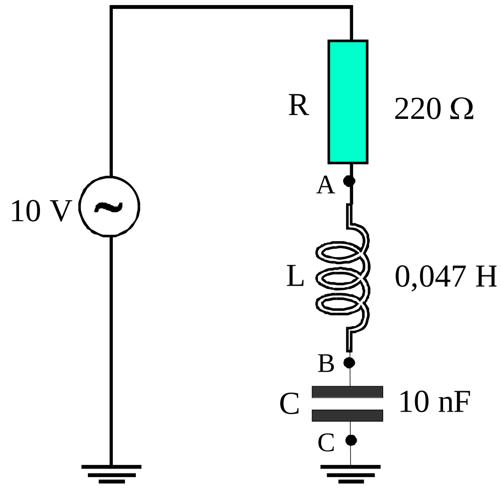
Fig.18 Corrente máxima no circuito RLC série na ressonância.

A seguir é mostrado um exemplo de cálculo de circuito RLC série na ressonância.

Exemplo 7:

Determinar a corrente máxima que pode circular no circuito da figura abaixo se a freqüência do gerador for variável.

Determinar também as tensões V_{AB}, V_{BC} e V_{AC} na ressonância. Considere 7.345 Hz como sendo a frequência de ressonância.



Solução:

A corrente máxima do circuito RLC série ocorre na ressonância, ou seja, onde $Z = R$. Portanto:

$$I = \frac{V_T}{Z}$$

Como na ressonância $Z = R$, tem-se que:

$$I_{máx} = \frac{10}{220} \qquad I_{máx} = 45{,}45\text{mA}$$

$$V_{AB} = V_L = I \times X_L \qquad X_L = 2\pi \times f \times L = 6{,}28 \times 7.345 \times 0{,}047 = 2.169\ \Omega$$

$$V_L = 0{,}04545 \times 2.169 = 98{,}58\text{V}$$

$$V_{BC} = V_C = I \times X_C \qquad X_C = 2.169\ \Omega \text{ (igual a } X_L\text{)}$$

$$V_C = 0{,}04545 \text{ x } 2.169 = 98{,}58\text{V}$$

$$V_{AC} = V_L - V_C = 98{,}58 - 98{,}58 = 0$$

Conclui-se que a tensão fornecida pela fonte está aplicada sobre o resistor.

$$V_R = I \times R \qquad V_R = 0{,}04545 \times 220 \qquad V_R = 10\text{V}.$$

LARGURA DA FAIXA

A largura de faixa, denominada em inglês de **bandwidth**, é definida como a faixa de freqüência em que a corrente do circuito RLC série se mantém em um valor maior que 70,7% da corrente máxima ($I = I_{máx} \times 0,707$).

A determinação da largura de faixa no gráfico típico de corrente do circuito RLC série aparece na **Fig.19**.

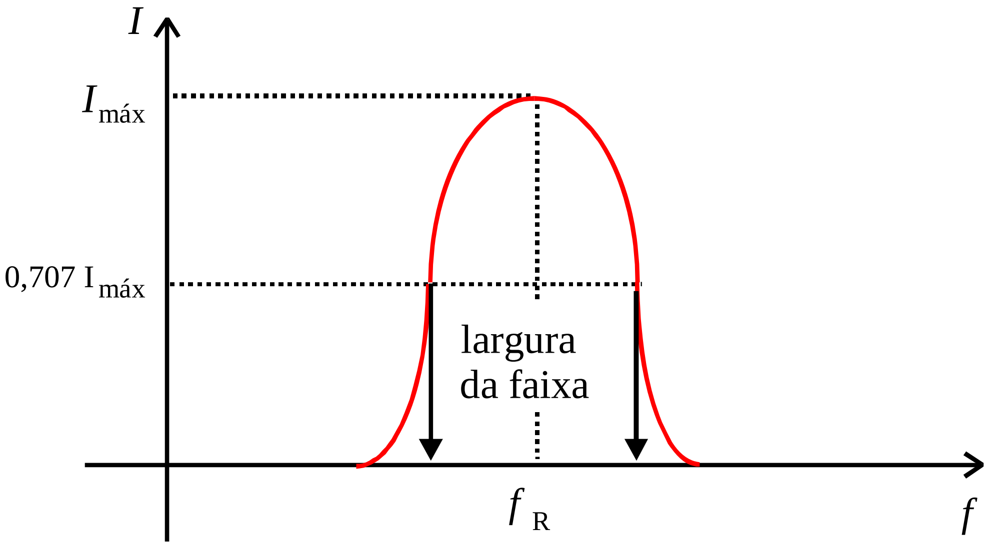


Fig.19 Largura de faixa.

A largura de faixa depende da capacitância do capacitor e da indutância do indutor.

De acordo com os valores utilizados, é possível estender ou comprimir a largura de faixa de um circuito RLC, como mostrado na **Fig.20**.

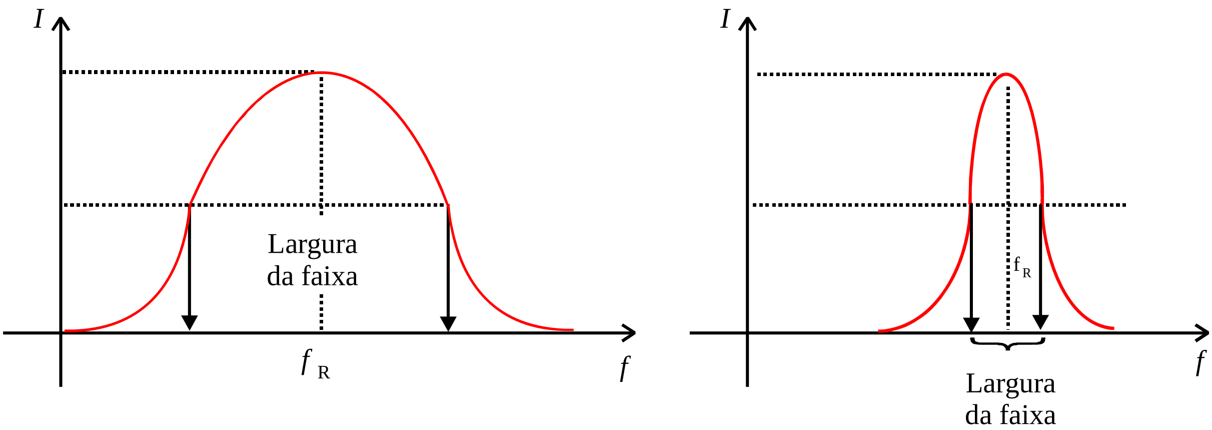


Fig.20 Variação da largura de faixa.

Esta característica é aproveitada para realizar a seleção de freqüências.

A **Fig.21** mostra como é possível obter um circuito seletor de freqüência.

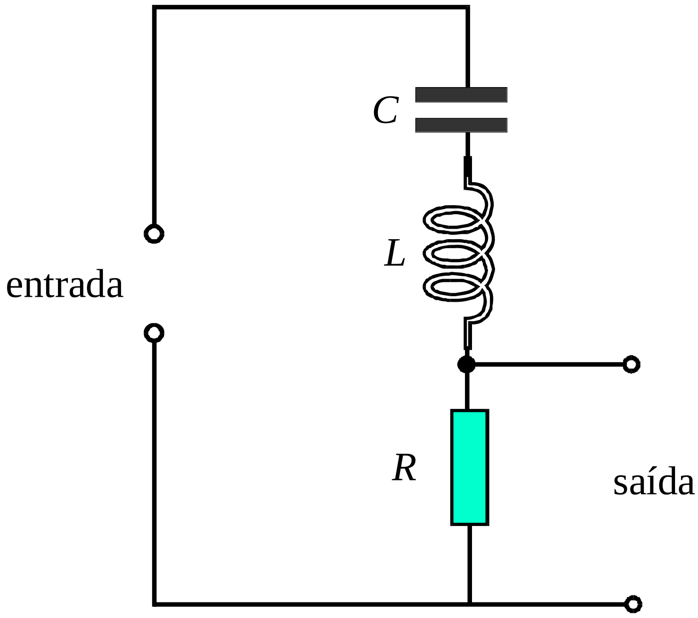


Fig.21 Circuito seletor de freqüência.

Nesse circuito, a tensão de saída (V_R) atinge o seu valor máximo na freqüência de ressonância, decrescendo à medida que a freqüência aplicada a entrada se afasta da freqüência de ressonância. Este principio é aproveitado em filtros para caixas de som.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Esboce os gráficos senoidal e fasorial das tensões e das correntes de um circuito RLC série em corrente alternada.

2. Como se determina a impedância de um circuito RLC série ?

3. O que se entende por frequência de ressonância ?

4. Para que frequência ocorre a impedância mínima em um circuito RLC série ?

BIBLIOGRAFIA

DAWES, CHESTER L. **Curso de Eletrônica**; Corrente Alternada. A course in electrical engineering Trad. de João Protásio Pereira da Costa. 18ª. ed., Porto Alegre, Lobo, 1979, vol.4.

VAN VALKENBURG, NOOGER & NEVILLE. **Eletricidade Básica**. 5ª. ed., Rio de Janeiro, Freitas Bastos, 1960, vol. 4 ilust.

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Melhoria da Qualidade – Buscar constantemente a melhoria do desempenho no trabalho, visando à excelência dos resultados.

Introdução

Como se sabe, os aparelhos de rádio e televisão permitem ao simples toque de um botão, que se sintonize esta ou aquela estação. Como será que um rádio **separa** o som de uma estação de todas as outras?

A resposta para esta pergunta está no processo de sintonia que tem muito a ver com circuitos RLC paralelo e suas características.

Este fascículo tem como objetivo fornecer ao leitor os fundamentos básicos para que possa mais tarde compreender o **processo de sintonia** que ocorre em aparelhos de rádio e televisão.

Para ter sucesso no desenvolvimento do conteúdo e atividades deste fascículo, o leitor já deverá ter conhecimentos relativos a:

- Capacitores.
- Indutores.
- Freqüência de ressonância.
- Representação fasorial de parâmetros elétricos.

O circuito RLC paralelo em corrente alternada

O circuito RLC paralelo é essencialmente defasador de correntes. Como em todo circuito paralelo, a tensão aplicada aos componentes é a mesma e serve como referência para o estudo do comportamento do circuito. A **Fig.1** mostra um circuito RLC paralelo.

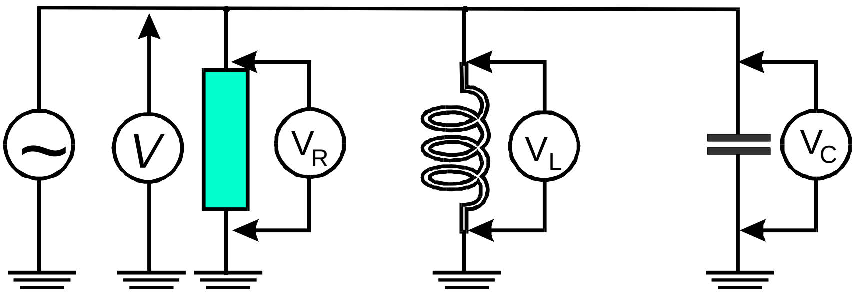


Fig.1 Circuito RLC paralelo.

Para a construção dos gráficos senoidal e fasorial do circuito RLC paralelo, a tensão é tomada como ponto de partida.

A aplicação de tensão ao circuito RLC paralelo provoca a circulação de três correntes (I_R, I_L, e I_C), como ilustrado na **Fig.2**.

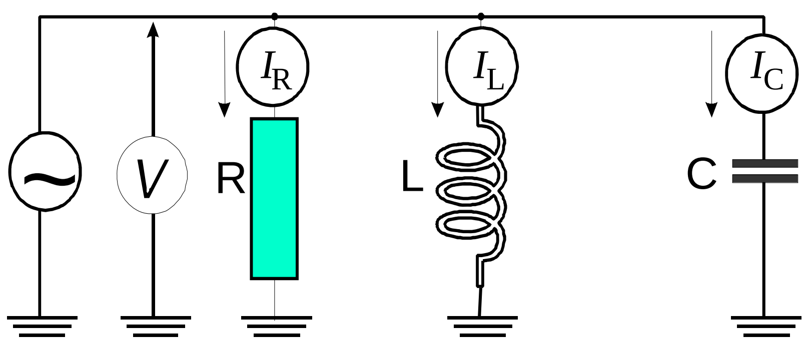


Fig.2 Corrente nos três componentes R, L e C.

A corrente no resistor está em fase com a tensão aplicada ao circuito.

Por outro lado, a corrente no indutor está atrasada 90º em relação à tensão aplicada.

A corrente no capacitor está adiantada 90º em relação à tensão aplicada, como mostrado na **Fig.3**.

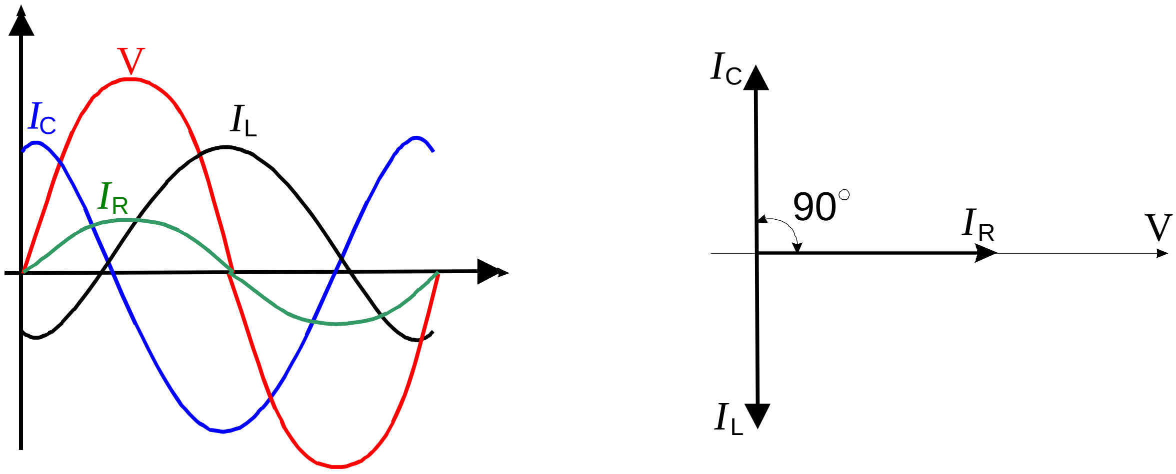


Fig.3 Gráficos senoidal e fasorial de V, I_C, I_R e I_L.

A **Fig.3** corresponde ao gráficos senoidal e fasorial completo do circuito RLC paralelo em CA.

AS CORRENTES NO CIRCUITO RLC PARALELO

As correntes individuais no resistor, indutor e capacitor de um circuito RLC paralelo são determinadas diretamente através da Lei de Ohm para circuitos de CA.

$$I_R = \frac{V}{R} \qquad I_L = \frac{V}{X_L} \qquad I_C = \frac{V}{X_C}$$

Estas três correntes dão origem a uma corrente total I_T fornecida pela fonte.

Essa corrente total é determinada pela soma fasorial, uma vez que as três correntes são defasadas entre si.

O primeiro passo é encontrar a resultante entre I_C e I_L que estão em oposição de fase, como pode ser visto na **Fig.4**.

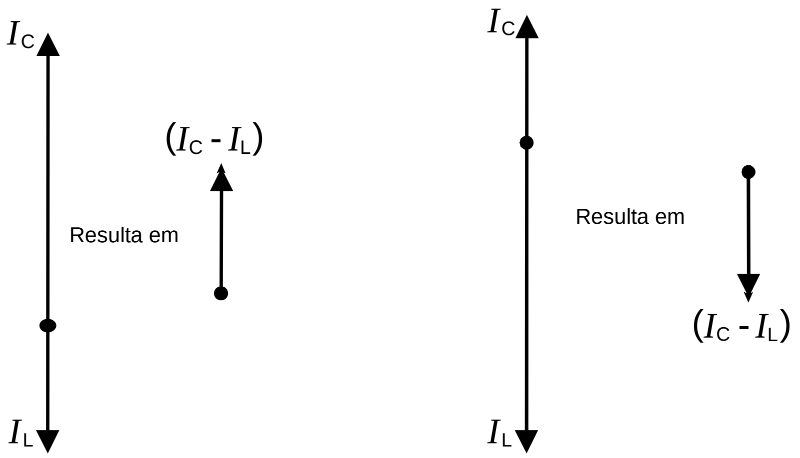


Fig.4 Corrente resultante entre I_C e I_L.

Uma vez que o sistema de três fasores foi reduzido a dois com defasagem entre si de 90º, a resultante pode ser determinada pelo Teorema de Pitágoras, como ilustrado na **Fig.5.**

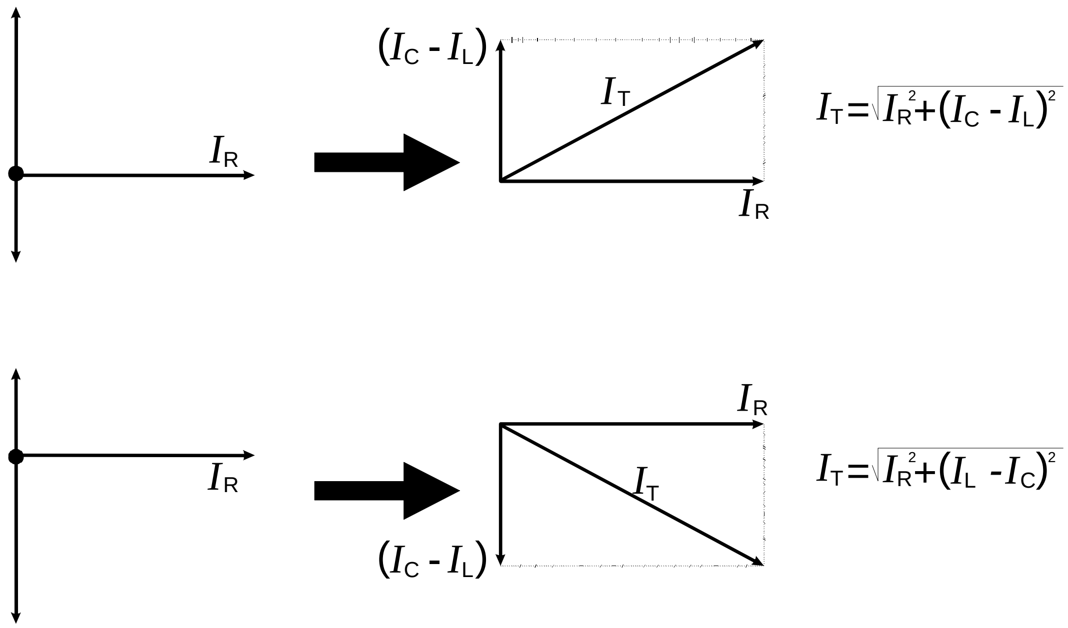


Fig.5 Determinação da corrente resultante em um circuito RLC paralelo pelo Teorema de Pitágoras.

A ordem dos termos I_L e I_C na equação só é importante se for necessário isolar um destes termos.

A IMPEDÂNCIA DO CIRCUITO RLC PARALELO

A impedância de um circuito RLC paralelo pode ser determinada pela Lei de Ohm para circuitos de CA se a tensão e a corrente total forem conhecidas.

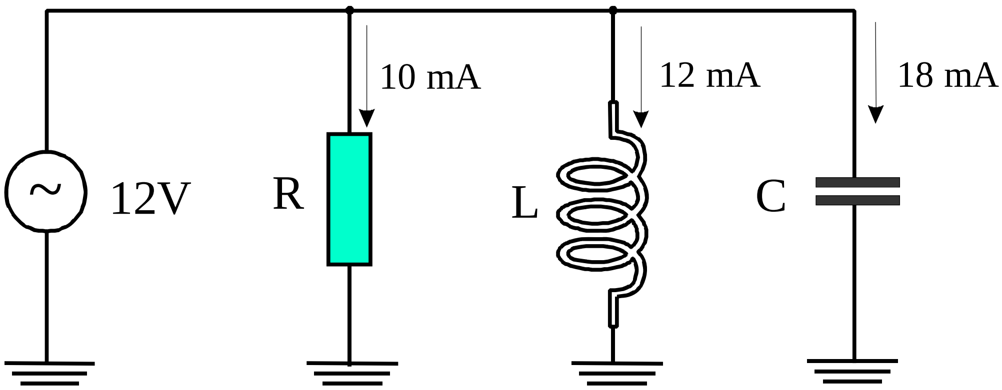
$$Z = \frac{V}{I_T}$$

A seguir são desenvolvidos dois exemplos de aplicação das equações da corrente total e da impedância do circuito RLC paralelo.

Exemplo 1:

Determinar I_T e Z no circuito da figura abaixo.

Solução:



$$I_T = \sqrt{I_R{}^2 + (I_C - I_L)^2} = \sqrt{10^2 + (18 - 12)^2}$$

$$I_T = 11{,}7 \text{ mA}$$

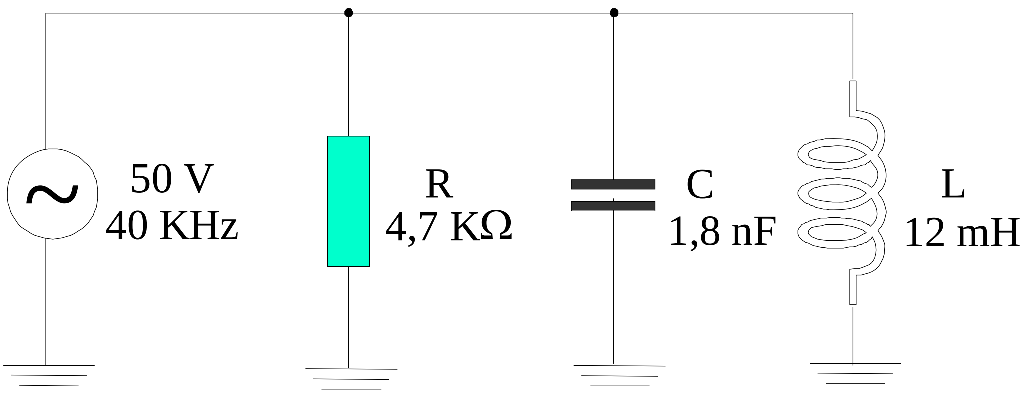
Observe que os valores das correntes foram colocados na equação em mA. Portanto a equação fornece um valor de I_T também em mA.

$$Z = \frac{V}{I_T} = \frac{12}{0{,}0117}$$

$$Z = 1.026\ \Omega$$

Exemplo 2:

Determinar I_R, I_L, I_C, I_T e Z no circuito da figura abaixo.



Solução:

$X_L = 2\pi \times f \times L = 6{,}28 \times 40 \times 12$ $\qquad X_L = 3.014\ \Omega$

$X_C = \dfrac{1}{2\pi \times f \times c} = \dfrac{1}{6{,}28 \times 40 \times 1{,}8 \times 10^{-6}}$ $\qquad X_C = 2.212\ \Omega$

$I_R = \dfrac{V}{R} = \dfrac{50}{4.700}$ $\qquad I_R = 10{,}6mA$

$I_C = \dfrac{V}{X_C} = \dfrac{50}{2.212}$ $\qquad I_C = 22{,}6\ mA$

$I_L = \dfrac{V}{X_L} = \dfrac{50}{3.014}$ $\qquad I_L = 16{,}6\ mA$

$I_T = \sqrt{I_R{}^2 + (I_C - I_L)^2}$ $\qquad I_T = \sqrt{10{,}6^2 + (22{,}6 - 16{,}6)^2}$ $\qquad I_T = 12{,}18\ mA$

$Z = \dfrac{V}{I_T} = \dfrac{50}{0{,}01218}$ $\qquad Z = 4.105\ \Omega$

Circuito LC paralelo ressonante

Quando um circuito LC paralelo é alimentado por uma fonte de CA na freqüência de ressonância, ocorre um fenômeno característico. Enquanto o capacitor está devolvendo a energia armazenada nas armaduras, o indutor absorve corrente gerando um campo magnético, como pode ser visto na **Fig.6**.

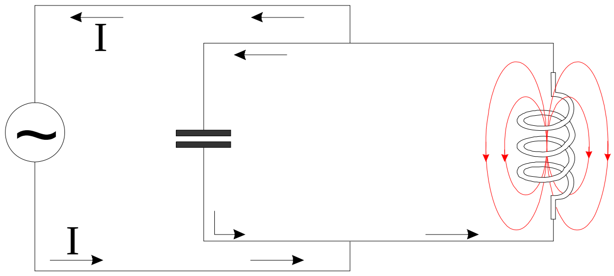


Fig.6 Descarga do capacitor e geração de campo magnetico na bobina.

A corrente absorvida pelo indutor provém quase totalmente da descarga do capacitor. A fonte de CA repõe apenas a energia desprendida nas perdas do circuito.

Quando o capacitor completa a descarga, o indutor apresenta o campo magnético de maior intensidade. Cessada a corrente para o indutor, o campo magnético começa a diminuir de intensidade. A auto-indução na bobina provoca a circulação de corrente no sentido contrário, como ilustrado na **Fig.7**.

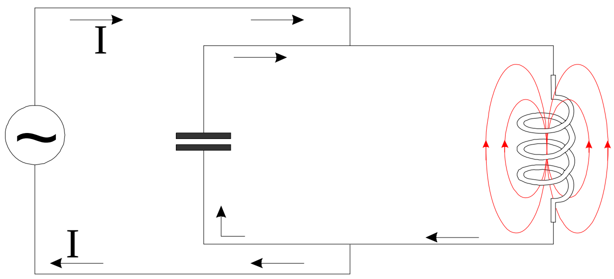


Fig.7 Carga do capacitor e desmagnetização da bobina.

A corrente gerada pelo indutor é absorvida pelo capacitor que inicia um processo de recarga. Novamente o gerador fornece apenas corrente para repor as perdas do circuito.

O processo de carga e descarga do capacitor, e magnetização e desmagnetização da bobina continua ocorrendo sucessivamente. Dessa forma, a fonte geradora supre apenas energia para reposição das perdas do circuito.

Observa-se, então, que o consumo de corrente de um circuito LC paralelo é mínimo quando a freqüência é a de ressonância. Isto pode ser demostrado também através do gráfico fasorial do circuito LC.

Na ressonância, os valores de X_L e X_C são iguais. Isto faz com que I_L e I_C também sejam iguais. Como I_L e I_C estão em oposição de fase, a resultante $I_L - I_C$ é nula.

Se o capacitor e principalmente o indutor, fossem componentes sem perdas, o circuito LC paralelo na freqüência de ressonância não absorveria nenhuma corrente do gerador.

Circuito RLC paralelo ressonante

O componente do circuito RLC pode ser analisado com base na equação da corrente total.

$$I_T = \sqrt{{I_R}^2 + (I_L - I_C)^2}$$

À medida em que a CA fornecida pelo gerador se aproxima da freqüência de ressonância, os valores de X_L e X_C se aproximam.

Na freqüência de ressonância, X_L e X_C são iguais fazendo com que as correntes I_L e I_C também sejam iguais.

Aplicando-se os valores de I_L e I_C iguais na equação da corrente total, tem-se que :

$$I_T = \sqrt{{I_R}^2 + (I_L - I_C)^2} \qquad I_T = \sqrt{{I_R}^2} \qquad I_T = I_R$$

Verifica-se que na ressonância apenas o resistor do circuito RLC absorve corrente da fonte.

O gráfico da **Fig.8** mostra o comportamento da corrente total em um circuito RLC em função da freqüência.

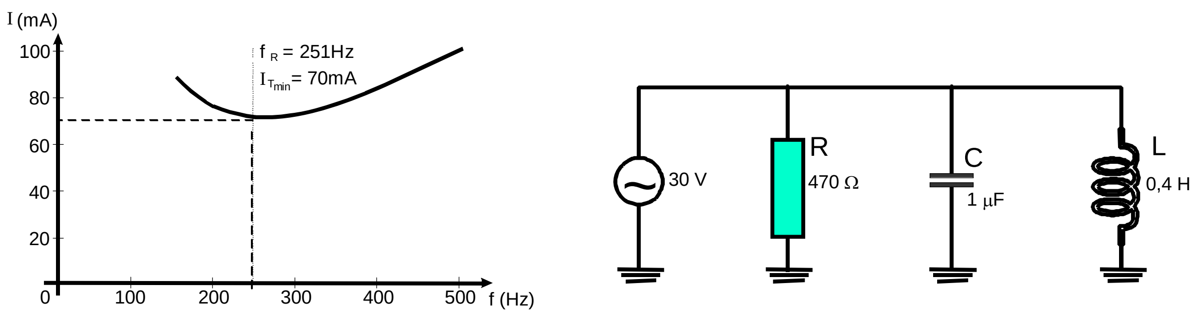


Fig.8 Corrente total em um circuito RLC em função da freqüência.

No circuito RLC paralelo, a corrente tem o valor mínimo na freqüência de ressonância.

Uma vez que a corrente total é mínima para o circuito RLC ressonante, pode-se concluir que sua impedância é máxima nesta situação.

$$Z = \frac{V}{I_T} \qquad \text{na ressonância} \qquad Z = \frac{V}{I_{Tmin}} = Z_{max}$$

O gráfico da **Fig.9** mostra a variação da impedância de um circuito RLC paralelo em função da freqüência.

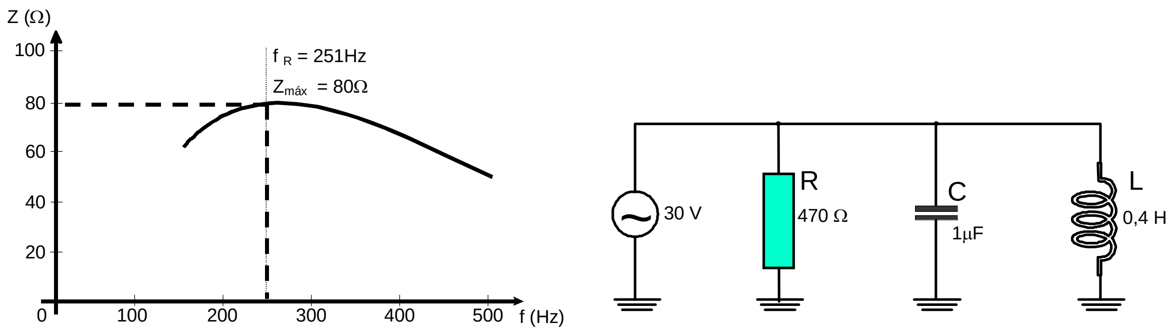


Fig.9 Comportamento da impedância para um circuito RLC paralelo

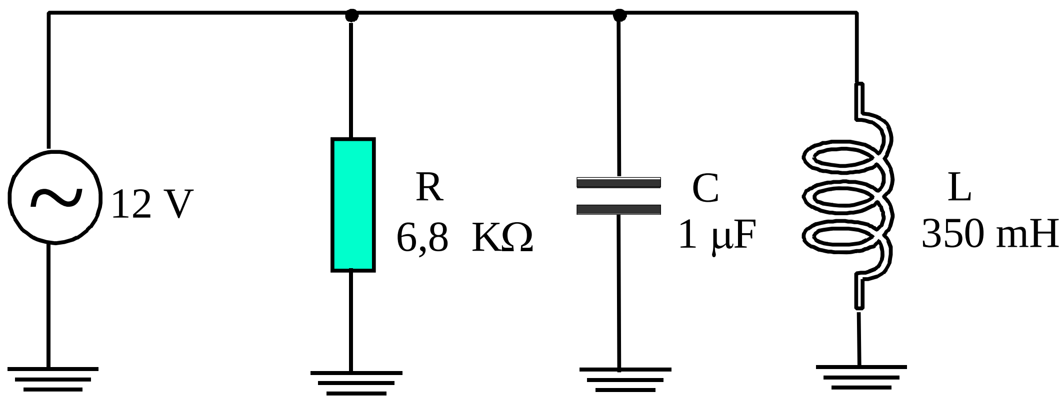
A impedância de um circuito RLC paralelo na freqüência de ressonância é máxima.

Os circuitos ressonantes paralelos são utilizados para geração de sinais em osciladores e para seleção de sinais em receptores de rádio e televisão.

A seguir é mostrado um exemplo de cálculo de circuito RLC paralelo ressonante.

Exemplo 3:

Determinar a freqüência de ressonância e os valores de I_T e Z na ressonância do circuito da figura abaixo.



Solução:

$$f_R = \frac{1.000}{2\pi\sqrt{LC}}$$ para L em henrys e C em microfarads

$$f_R = \frac{1.000}{6{,}28\sqrt{0{,}35 \times 1}} = \frac{1.000}{3{,}718} \qquad f_R = 269\text{Hz}$$

Para calcular I_T, pode-se partir do princípio que na ressonância $Z = R$:

$$Z = 6{,}8\ k\Omega$$

$$I_T = \frac{V}{Z} \qquad I_T = \frac{12}{6.800} \qquad I_T = 1{,}76\ \text{mA}$$

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Esboce os gráficos senoidal e fasorial das tensões e das correntes de um circuito RLC paralelo em corrente alternada.

2. Que valor assume a corrente em um circuito RLC paralelo na frequência de ressonância ?

BIBLIOGRAFIA

DAWES, CHESTER L. **Curso de eletrotécnica**; Corrente Alternada. A course in electrical engineering Trad. de João Protásio Pereira da Costa. 18.ª ed., Porto Alegre, Globo, 1979, vol. 4

VAN VALKENBURG, NOOGER & NEVILLE. **Eletricidade Básica**. 5.ª ed., Rio de Janeiro, Freitas Bastos, 1960, vol. 4. ilust.

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Participar do processo de modernização industrial decorrente da Adoção de novas tecnologias, elegendo prioridades em nível nacional.

Introdução

O comportamento de um circuito RLC em corrente alternada depende fundamentalmente da sua configuração de montagem: série ou paralela.

Cada uma das configurações já foi estudada individualmente. Este fascículo foi elaborado para possibilitar uma comparação mais direta entre as características de cada configuração, abordando os aspectos em que os dois diferem e uma aplicação de cada um.

Para ter sucesso no desenvolvimento dos conteúdos e atividades deste fascículo, o leitor já deverá ter conhecimentos relativos a:

- Circuito RLC série em corrente alternada.
- Circuito RLC paralelo em corrente alternada.

Impedância dos circuitos RLC série e paralelo

A impedância do circuito RLC série em CA é dada pela equação:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_c)^2} \quad (1)$$

Uma vez que os valores de X_L e X_C dependem da freqüência, a impedância do circuito RLC série é dependente da freqüência.

A **Fig.1** mostra a dependência que a impedância sofre em relação a freqüência.

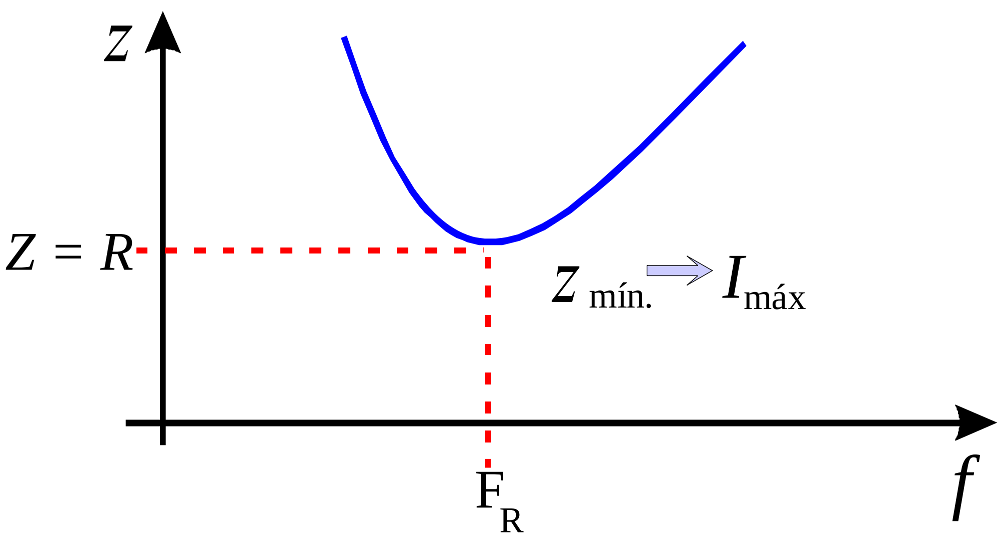


Fig.1 Comportamento da impedância no circuito RLC série.

No circuito RLC paralelo, a impedância é dada por :

$$Z = \frac{V}{I_T} \quad (2)$$

Como a corrente total é dada pela expressão

$$I_T = \sqrt{I_R^2 + (I_L - I_C)^2} \quad (3)$$

pode-se rescrever a fórmula da impedância do circuito RLC paralelo da seguinte forma:

$$Z = \frac{V}{\sqrt{I_R^2 + (I_L - I_C)^2}} \quad (4)$$

O resultado desta equação também depende da freqüência, visto que I_L e I_C dependem das reatâncias X_L e X_C, que por sua vez dependem da freqüência.

A **Fig.2** mostra claramente o comportamento da impedância do circuito RLC paralelo.

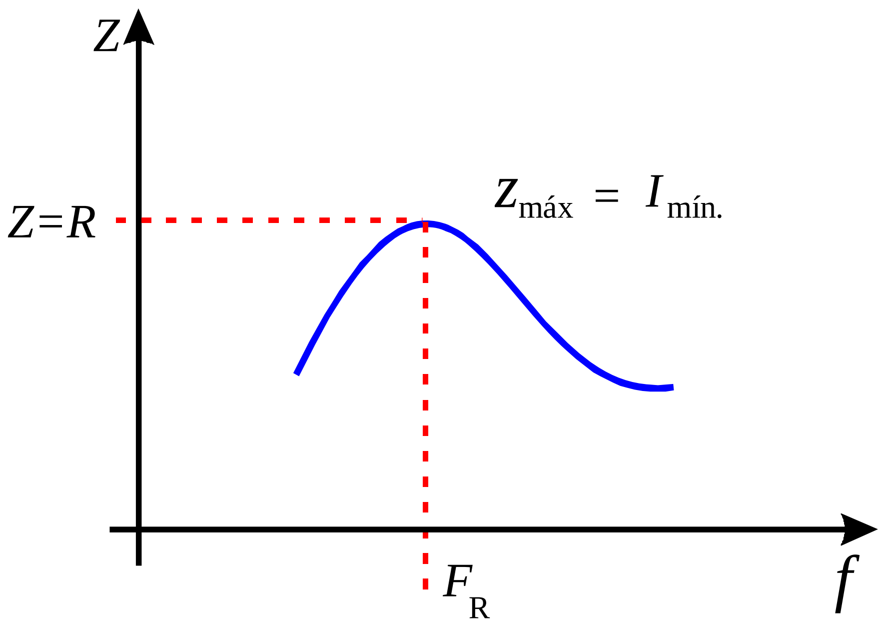


Fig.2 Comportamento da impedância no circuito RLC paralelo.

Uma vez que os gráficos dos circuitos série e paralelo foram obtidos a partir dos mesmos valores de R, L e C e freqüências, pode-se sobrepô-los para uma comparação, como pode ser visto na **Fig.3**.

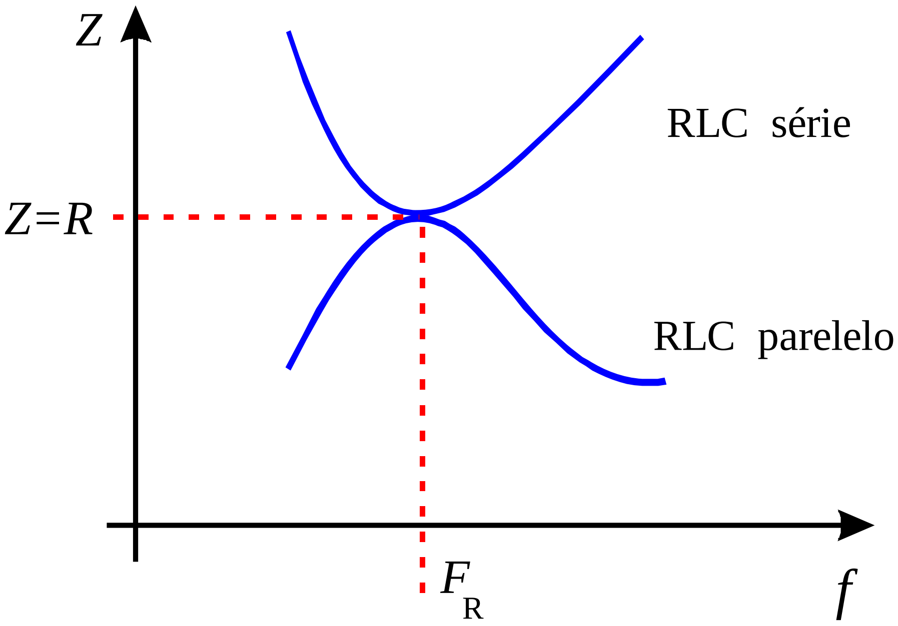


Fig.3 Comportamento da impedância nos circuitos RLC série e paralelo.

A comparação dos gráficos mostra claramente que os comportamentos dos circuitos RLC série e paralelo são exatamente opostos. Isto pode ser confirmado analisando-se o gráfico na freqüência de ressonância: a impedância é mínima no circuito RLC série e máxima no circuito RLC paralelo.

Estas características são utilizadas para aplicações distintas.

APLICAÇÕES DOS CIRCUITOS RLC SÉRIE E PARALELO

A dependência que os circuitos RLC apresentam em relação a freqüência proporciona a aplicação destes circuitos em situações onde se deseja:

1. Separar uma determinada freqüência em um conjunto.
2. Eliminar uma determinada freqüência de um conjunto.

CIRCUITO RLC PARALELO

Um aparelho de rádio, por exemplo, recebe os sinais (freqüências) transmitidos por todas as emissoras e deve reproduzir apenas uma. É necessário, portanto, separar uma única freqüência de todo o conjunto. Para esta finalidade, utilizam-se os circuitos RLC paralelos.

A forma básica como esta separação se processa pode ser compreendida analisando, primeiramente, um único circuito RLC paralelo acrescido de um resistor em série, como ilustrado na **Fig.4**.

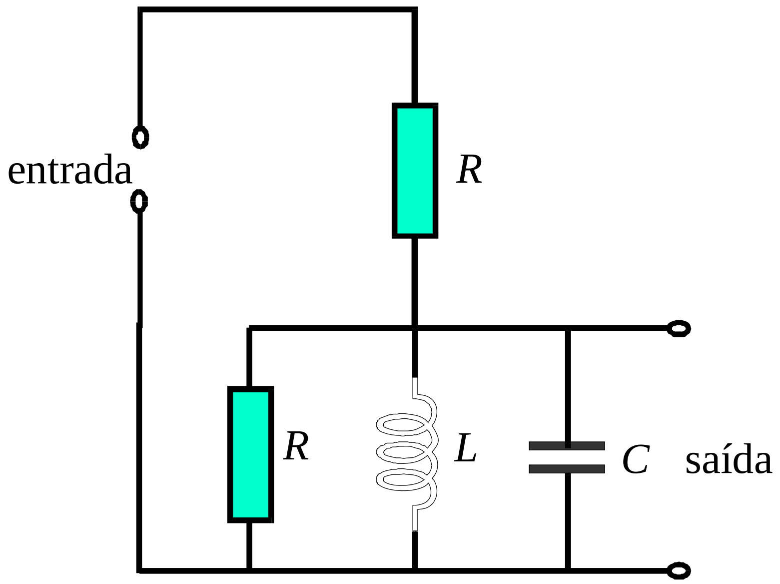


Fig.4 Circuito RLC paralelo com resistor em série.

Este circuito é, na realidade, um divisor de tensão em que as diversas freqüências são aplicadas a entrada e a saída é tomada sobre o circuito RLC paralelo.

A tensão de saída do divisor depende da resistência *R* e da impedância *Z* do circuito paralelo. Quanto maior a impedância *Z* do circuito RLC paralelo, maior será a tensão de saída.

Como a impedância do circuito RLC paralelo é máxima na freqüência de ressonância, pode-se concluir que a tensão máxima na saída ocorrerá para a freqüência de ressonância.

Suponha que sejam aplicadas simultaneamente 3 freqüências a entrada do circuito, sendo uma delas a freqüência de ressonância. As três freqüências aparecerão na saída, mas a freqüência de ressonância terá amplitude maior que as outras duas, como ilustrado na **Fig.5**.

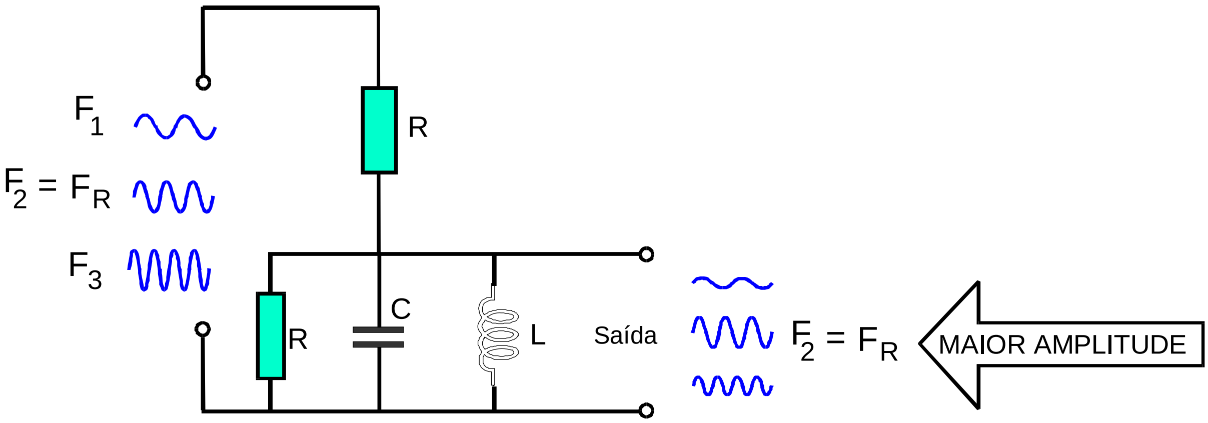


Fig.5 Amplitude maior da freqüência de ressonância.

Verifica-se que as freqüências diferentes de f_R sofreram maior redução de nível no divisor.

Aplicando-se a saída deste divisor a entrada de outro com a mesma freqüência de ressonância, o fenômeno se repete. Como pode ser visto na **Fig.6**, as freqüências diferentes de f_R vão desaparecendo cada vez mais.

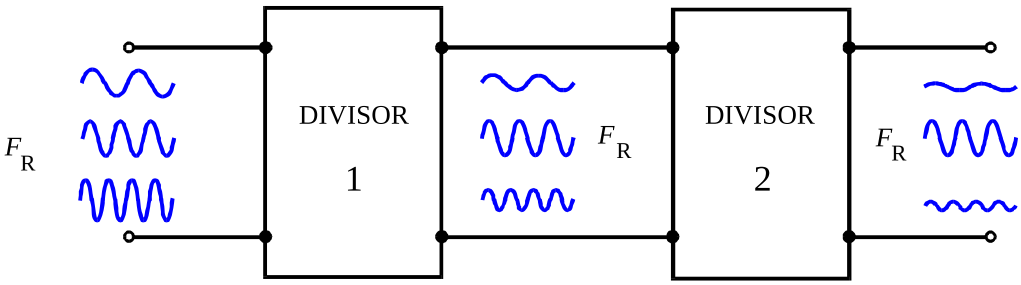


Fig.6 Desaparecimento contínuo das freqüências diferentes de f_R.

Uma determinada freqüência pode ser separada de um conjunto através de uma seqüência de circuitos RLC paralelos com freqüência de ressonância igual àquela que se deseja separar.

Na prática, a separação de estações em um receptor de rádio emprega um circuito LC paralelo sem os resistores, mas o princípio de funcionamento é exatamente o descrito.

CIRCUITO RLC SÉRIE

Uma aplicação para o circuito RLC série é a eliminação de uma freqüência de um conjunto.

Tomando-se, como exemplo, um aparelho de televisão.

O aparelho recebe os sinais de freqüência de todos os canais de televisão. Através de circuitos LC paralelos, apenas um canal é selecionado, como em um aparelho de rádio. A **Fig.7** mostra este princípio.

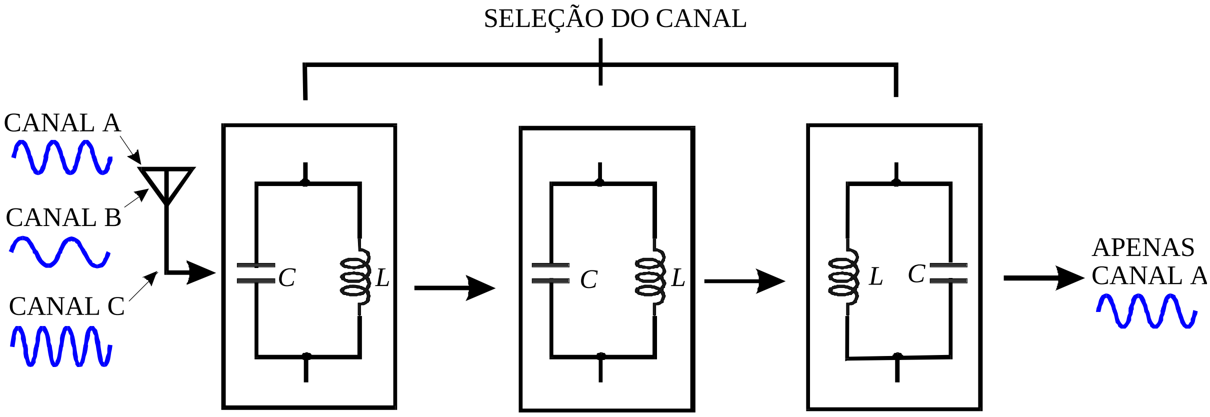


Fig.7 Circuitos RLC série para seleção de canais.

O sinal do Canal A compõe-se de sinais de imagem (vídeo) e som (áudio) que devem se encaminhar para circuitos diferentes, como ilustrado na **Fig.8**.

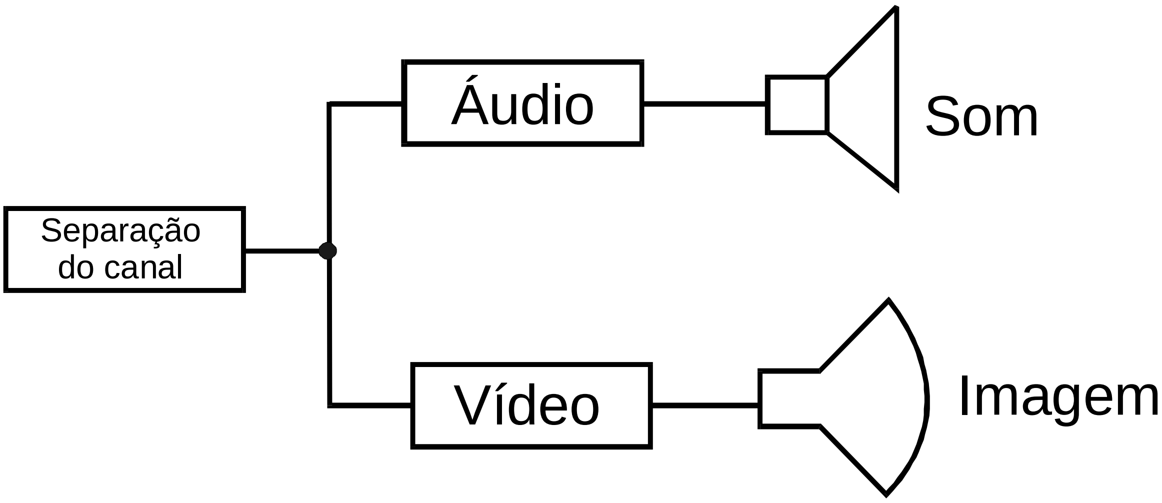


Fig.8 Separação do Canal A em sinal de áudio e som.

Para evitar que o sinal de som interfira na imagem, é necessário acrescentar antes dos circuitos de vídeo, um circuito que elimine a freqüência de som. Este circuito, que pode ser visto na **Fig.9**, denomina-se de armadilha. Para esta função, utiliza-se um circuito RLC em série.

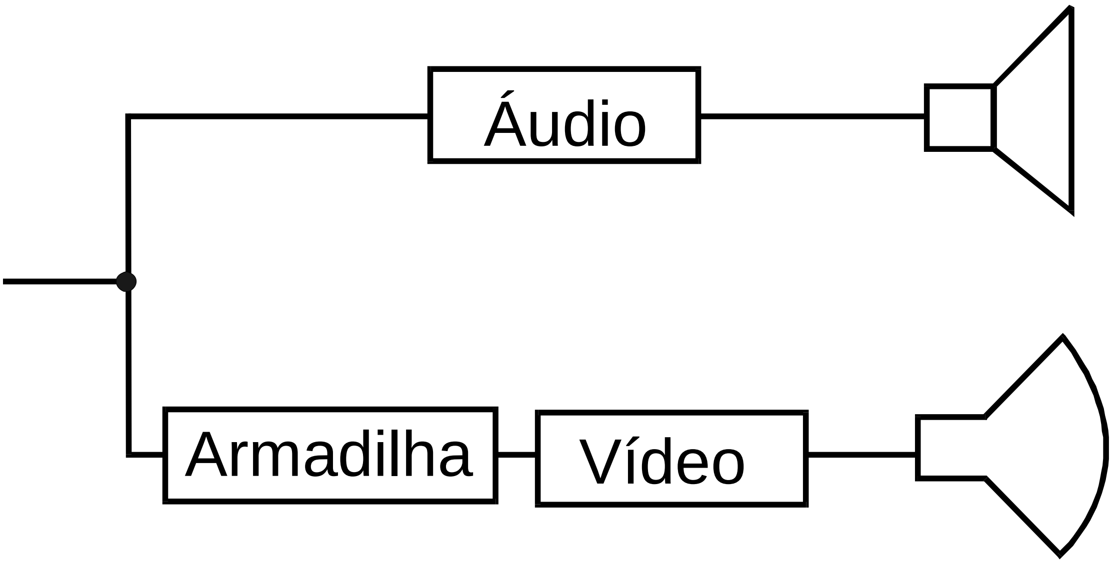


Fig.9 Circuito armadilha.

Suponha que sejam aplicadas três freqüências diferentes a entrada de um circuito RLC série, sendo uma destas a freqüência de ressonância e que o circuito é um divisor de tensão em que a saída é tomada sobre capacitor e o indutor, como mostrado na **Fig.10**.

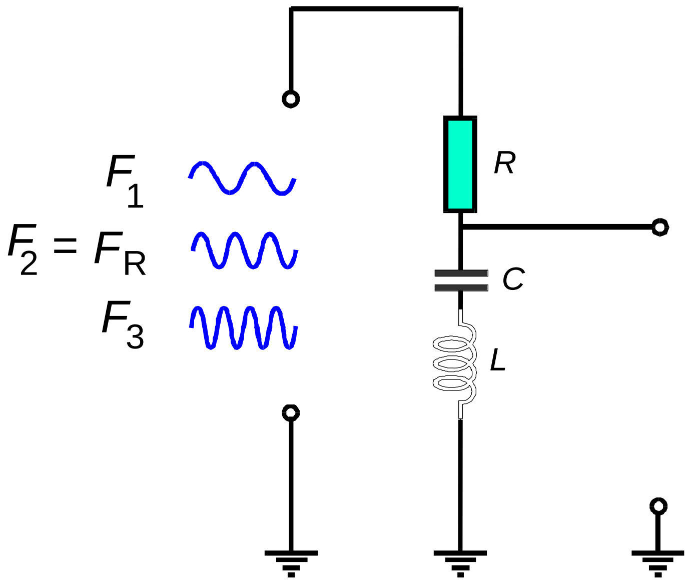


Fig.10 Aplicação de três freqüências diferentes à entrada de um circuito RLC série.

A tensão de saída do divisor é dada por:

$$V_{\text{Saída}} = V_C - V_L$$

uma vez que as tensões no capacitor e indutor são opostas em fase.

Na freqüência de ressonância $V_C = V_L$, o que faz com que a tensão de saída seja nula nesta freqüência, conforme mostrado na **Fig.11**.

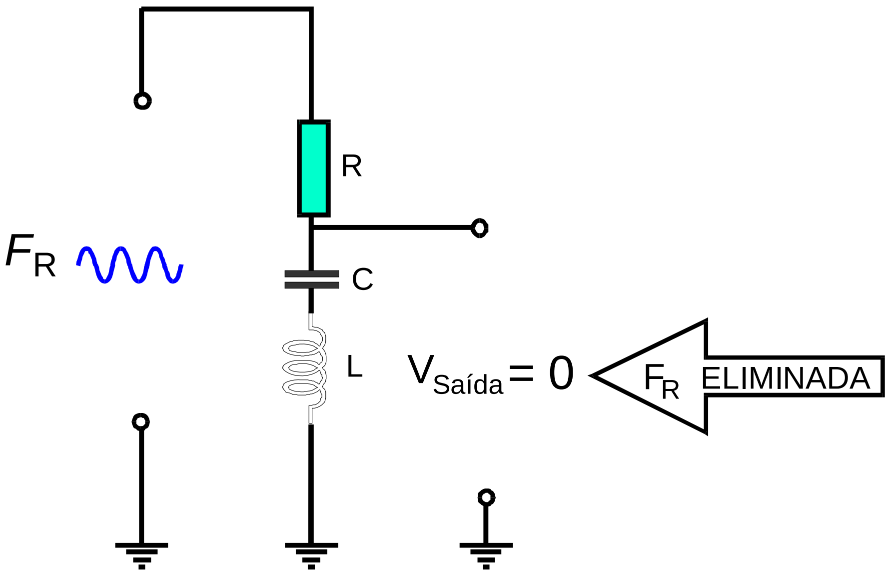


Fig.11 Tensão de saída nula para $V_C = V_L$ ($f = f_R$).

Para todas as outras freqüências, V_C é diferente de V_L, de forma que o divisor fornece uma tensão de saída $V_C - V_L \neq 0$, como pode ser visto na **Fig.12**.

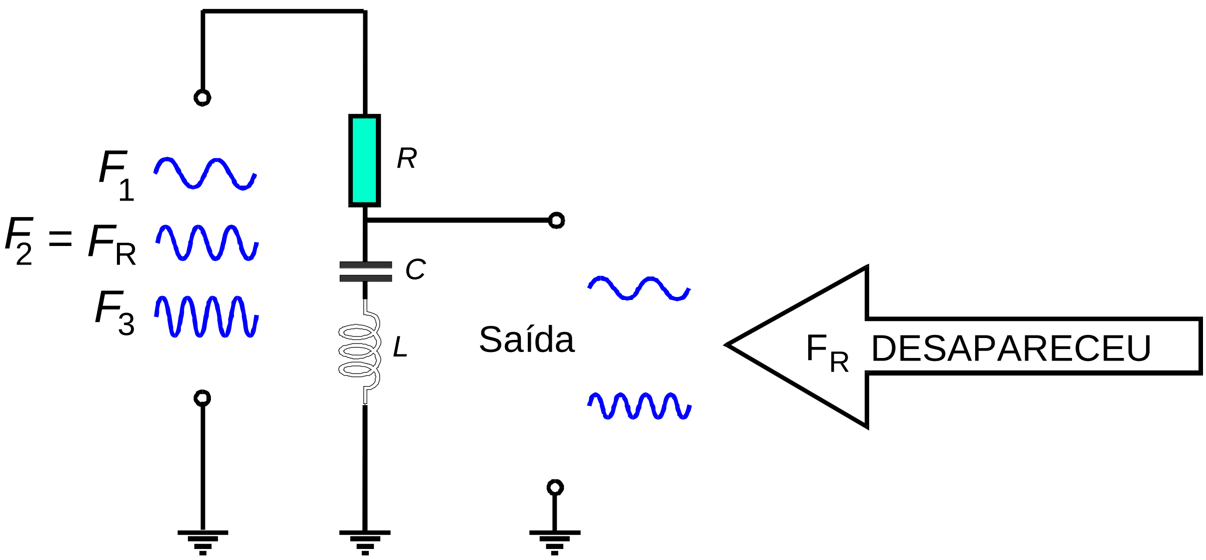


Fig.12 Tensão de saída diferente de zero para $V_C \neq V_L$ ($f \neq f_R$).

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Como se comporta a impedância de um circuito RLC em função da frequência?
2. Quais as aplicações dos circuitos RLC?
3. Como pode ser separada uma determinada frequência de um conjunto?

BIBLIOGRAFIA

DAWES, CHESTER L. **Curso de Eletrotécnica**.Trad. de João Protásio Pereira da Costa. 18ª. ed., Porto Alegre, Globo, 1979, vol. 4.

VAN VALKENBURG, NOOGER & NEVILLE. **Eletrônica Básica**. Rio de Janeiro, Freitas Bastos, c 1960, vol.3 ilust.

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Introdução

A eletrônica se desenvolveu de forma espantosa nas últimas décadas. A cada dia novos componentes são colocados no mercado, simplificando o projeto e construção de novos equipamentos cada vez mais sofisticados.

Um dos fatos que contribuiu de forma marcante para essa evolução foi a descoberta e aplicação dos materiais semicondutores. O primeiro componente fabricado com esses materiais, que foi denominado de **diodo semicondutor**, é até hoje utilizado para a transformação de corrente alternada em corrente contínua.

Este fascículo trata dos materiais semicondutores e do diodo semicondutor com suas características e forma de teste, visando a fornecer os conhecimentos indispensáveis para o entendimento da transformação de *ca* em *cc*.

Para a boa compreensão do conteúdo e desenvolvimento das atividades contidas neste fascículo, o leitor deverá estar familiarizado com os conceitos relativos a:

- Corrente elétrica.
- Materiais condutores e isolantes.

Materiais semicondutores

Alguns materiais apresentam propriedades de condução elétrica intermediárias entre aquelas inerentes aos isolantes e aos condutores. Tais materiais são denominados de **semicondutores.** A característica mais interessante do material semicondutor, e que o torna atrativo do ponto de vista da fabricação de componentes eletrônicos, é a possibilidade de se poder variar substancialmente sua condutividade elétrica pela alteração controlada de sua composição química ou estrutura cristalina.

Um exemplo típico de um elemento químico que pode formar materiais exibindo características elétricas distintas é o **carbono**. Dependendo da forma com que os átomos de carbono se interligam, o material formado pode tornar-se um isolante ou um semicondutor.

Uma das formas naturais de matéria formada por átomos de carbono arranjados ordenadamente em uma estrutura cristalina é o **diamante**, que é um material de grande dureza e **eletricamente isolante**.

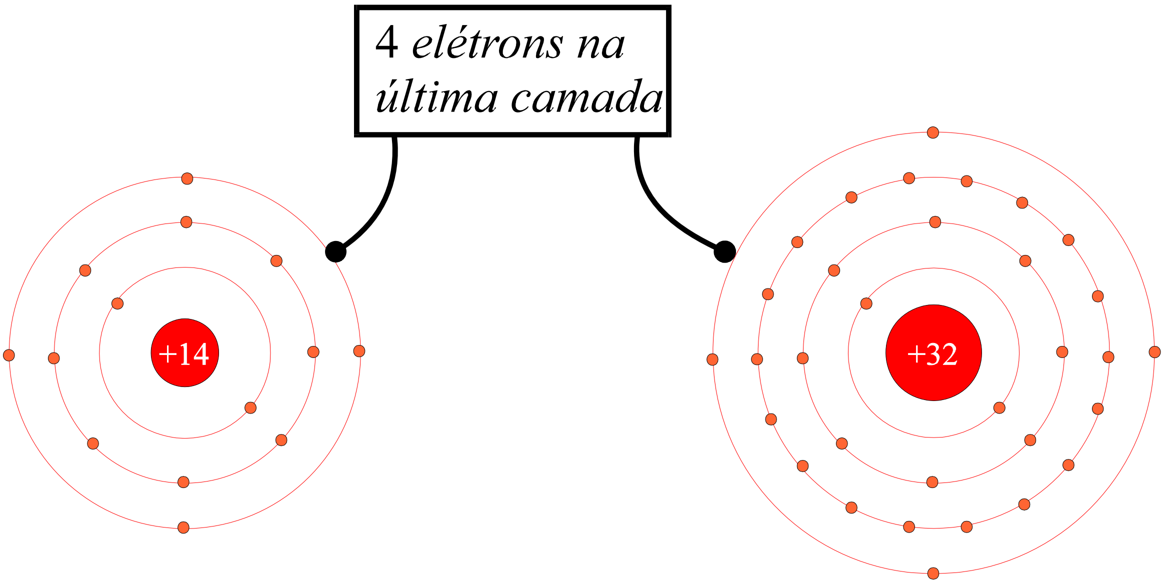
Os átomos de carbono podem também arranjar-se naturalmente em uma estrutura **amorfa** ou **não cristalina**, dando origem ao **grafite** que é um material **semicondutor**.

Nas seções seguintes serão discutidas algumas das características principais associadas aos materiais semicondutores e a forma pela qual esses materiais podem ser utilizados na construção de dispositivos eletrônicos.

CONSTITUIÇÃO QUÍMICA

Os materiais semicondutores mais simples são constituídos de átomos de um único elemento químico com quatro elétrons na camada de valência. Átomos exibindo esta configuração eletrônica são denominados de **átomos tetravalentes**.

A **Fig.1** ilustra a configuração dos átomos tetravalentes de **germânio (Ge)** e **silício (Si)** que dão origem a materiais semicondutores.



Silício
14 prótons
14 elétrons

Germânio
32 prótons
32 elétrons

Fig.1 Configuração eletrônica dos átomos de silício e germânio.

Os átomos que têm quatro elétrons na camada de valência tendem a se arranjar ordenadamente na formação do material segundo uma estrutura cristalina com átomos vizinhos compartilhando seus elétrons de valência, conforme ilustrado na **Fig.2**.

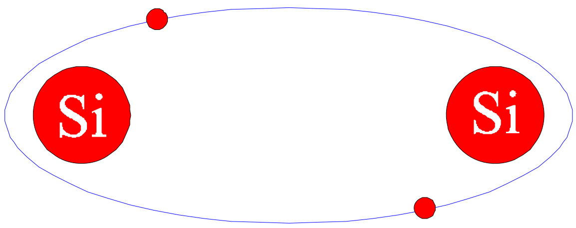
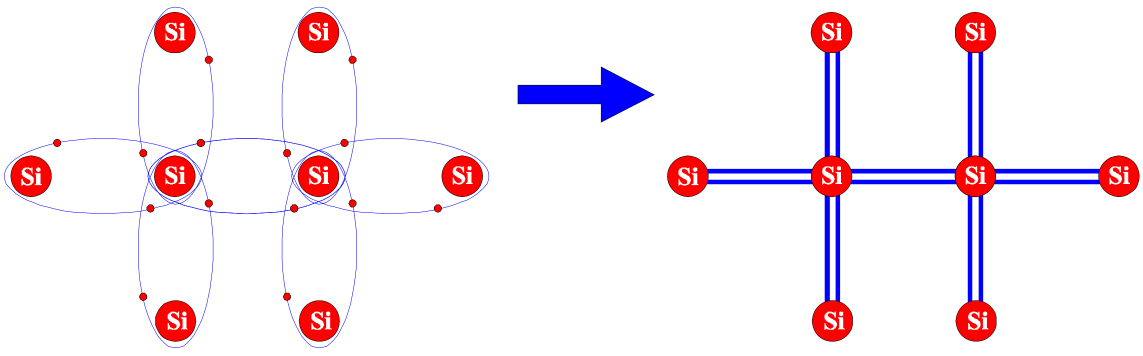


Fig.2 Compartilhamento de elétrons de valência entre dois átomos de silício.

O compartilhamento de elétrons entre átomos tetravalentes em uma estrutura cristalina é ilustrado na **Fig.3a**. Esse tipo de ligação química recebe a denominação de **ligação covalente**, sendo representada simbolicamente por dois traços interligando cada par de núcleos, como mostrado na **Fig.3b**.



(a) **(b)**

Fig.3 Compartilhamento de elétrons entre átomos ligados covalentemente em uma estrutura cristalina e a representação simbólica correspondente.

Nas ligações covalentes os elétrons permanecem fortemente ligados ao par de núcleos interligados. Por esta razão os materiais formados por estruturas cristalinas puras, compostas unicamente por ligações covalentes, adquirem características de boa isolação elétrica.

Materiais com estruturas cristalinas puras formadas por elementos químicos tetravalentes são bons isolantes elétricos.

Na forma cristalina, o silício e o germânio puros são materiais semicondutores com propriedades elétricas próximas àquelas de um isolante perfeito.

A **Fig.4** mostra uma representação planar do arranjo de átomos tetravalentes em uma rede cristalina, onde cada átomo forma quatro ligações covalentes com seus vizinhos.

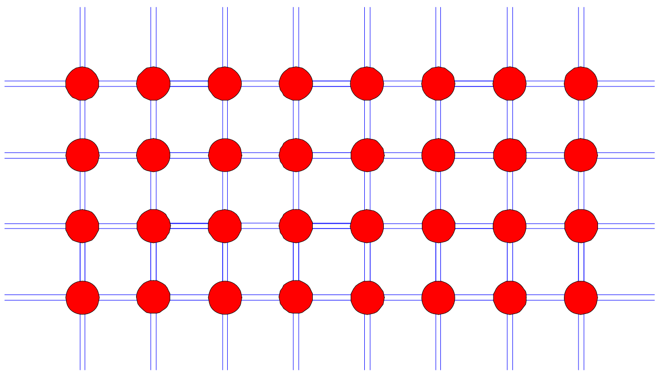


Fig.4 Representação planar de uma rede cristalina de átomos tetravalentes.

A representação ilustrada na **Fig.4** é uma versão simplificada da situação real em que os átomos tetravalentes se arranjam em uma estrutura tridimensional. Essa estrutura tridimensional é ilustrada na **Fig.5**, com os átomos interligados em uma geometria tetraédrica. O tetraedro assim formado sempre contém um átomo central interligado aos seus quatro vizinhos posicionados nos vértices do tetraedro.

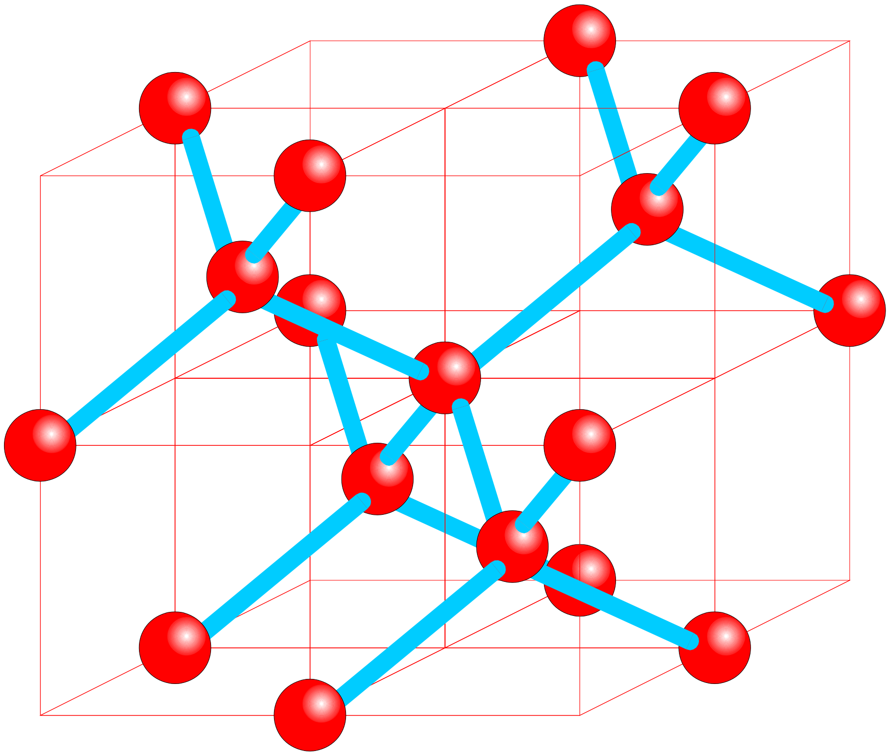


Fig.5 Estrutura tridimensional de uma rede cristalina de átomos tetravalentes.

DOPAGEM

A **dopagem** é um processo químico no qual átomos estranhos são introduzidos na estrutura cristalina de uma substância.

Os materiais encontrados em sua forma natural, geralmente contêm um certo grau de **impurezas** que se instalam durante o processo de formação desses materiais. Essa situação pode ser caracterizada como um processo de **dopagem natural**.

A dopagem pode também ser realizada em laboratório, com o objetivo de introduzir no cristal uma determinada quantidade de átomos de impurezas, de forma a alterar, de maneira controlada, as propriedades físicas naturais do material.

Em um cristal semicondutor a dopagem é geralmente realizada para alterar suas propriedades elétricas. O grau de condutividade bem como o mecanismo de condução do semicondutor dopado irá depender dos tipos de átomos de impureza introduzidos no cristal, como descrito a seguir.

SEMICONDUTOR TIPO *n*

Quando o processo de dopagem introduz na estrutura cristalina do semicondutor uma quantidade de átomos contendo excesso de um elétron de valência relativamente ao número de elétrons da camada mais externa de cada átomo do cristal, forma-se um **semicondutor tipo *n***. Neste processo, uma pequena quantidade dos átomos dopantes introduz apenas ligeiras modificações na estrutura cristalina do semicondutor puro.

Um exemplo típico de formação de um semicondutor tipo *n* ocorre quando átomos de fósforo são introduzidos na estrutura cristalina do silício. Conforme ilustrado na **Fig.6**, apenas quatro dos cinco elétrons de valência do fósforo, podem participar das ligações covalentes com os átomos de silício.

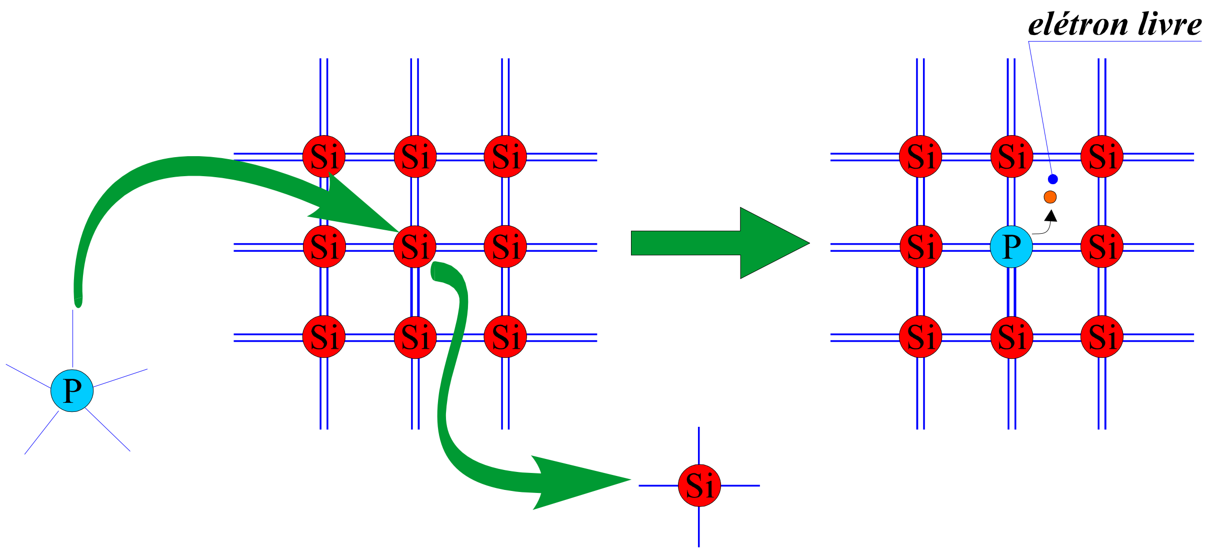


Fig.6 Dopagem de silício com átomo de fósforo.

Como mostrado na **Fig.6**, o quinto elétron de valência do átomo de fósforo não participa de nenhuma ligação covalente, pois não existe um segundo elétron de valência disponível nos átomos vizinhos que possibilite a formação dessa ligação. Esse elétron extra pode, portanto, ser facilmente liberado pelo átomo de fósforo, passando a transitar livremente através da estrutura do cristal semicondutor.

Com a adição de impurezas, e conseqüente aumento no número de elétrons livres, conforme ilustrado na **Fig.7**, o cristal que era puro e isolante passa a ser condutor de corrente elétrica. É importante observar que embora o material tenha sido dopado, o número total de elétrons permanece igual ao número total de prótons no cristal, de forma que **o material continua eletricamente neutro**.

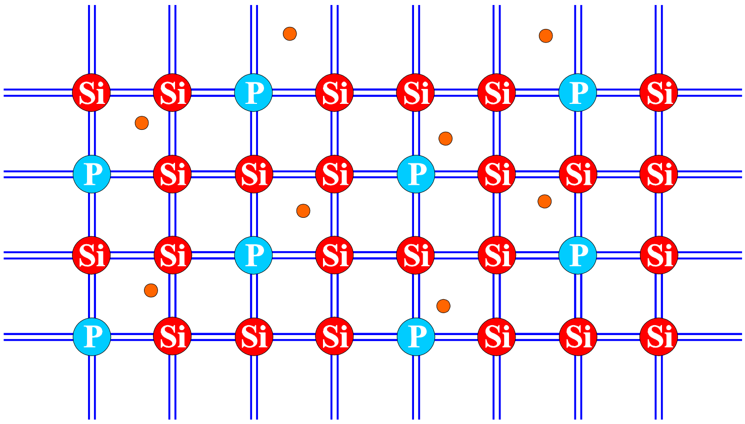


Fig.7 Elétrons livres no silício dopado com fósforo.

O semicondutor dopado com átomos contendo excesso de um ou mais elétrons na camada de valência recebe a denominação de **semicondutor tipo *n***, pois nesses materiais a corrente elétrica é conduzida predominantemente por cargas **negativas**. Essa condução elétrica ocorre independentemente da polaridade da tensão aplicada entre as extremidades do material semicondutor, conforme ilustrado na **Fig.8**.

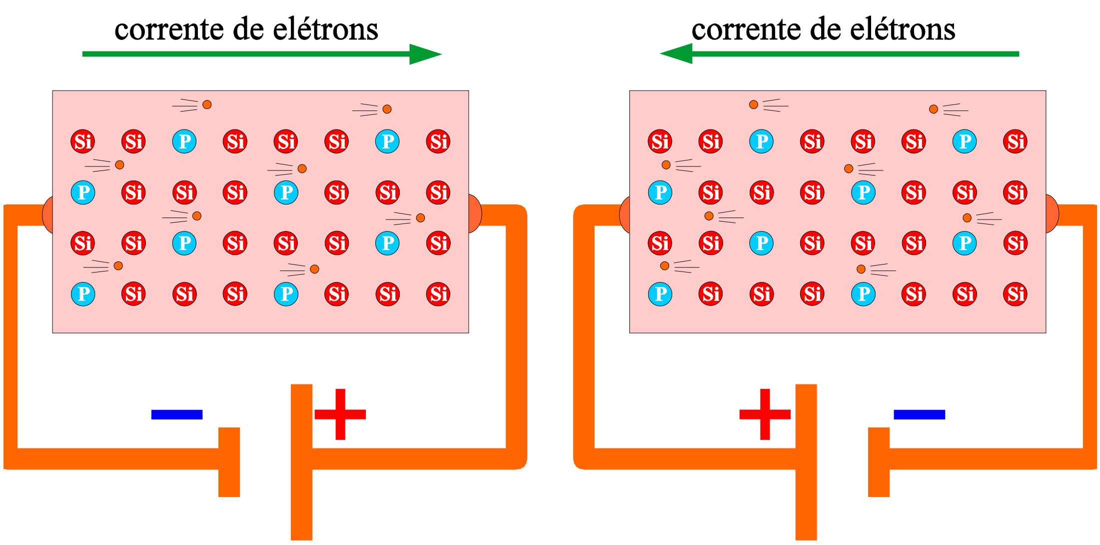


Fig.8 Corrente de elétrons em um semicondutor tipo *n*.

SEMICONDUTOR TIPO *p*

Quando os átomos introduzidos na estrutura cristalina do semicondutor exibem deficiência de um elétron de valência relativamente ao número de elétrons da camada mais externa de cada átomo do cristal, forma-se um **semicondutor tipo *p***.

O átomo de índio, por exemplo, que tem três elétrons na camada de valência, quando utilizado no processo de dopagem do silício dá origem a um semicondutor tipo *p*, conforme ilustrado na **Fig.9**.

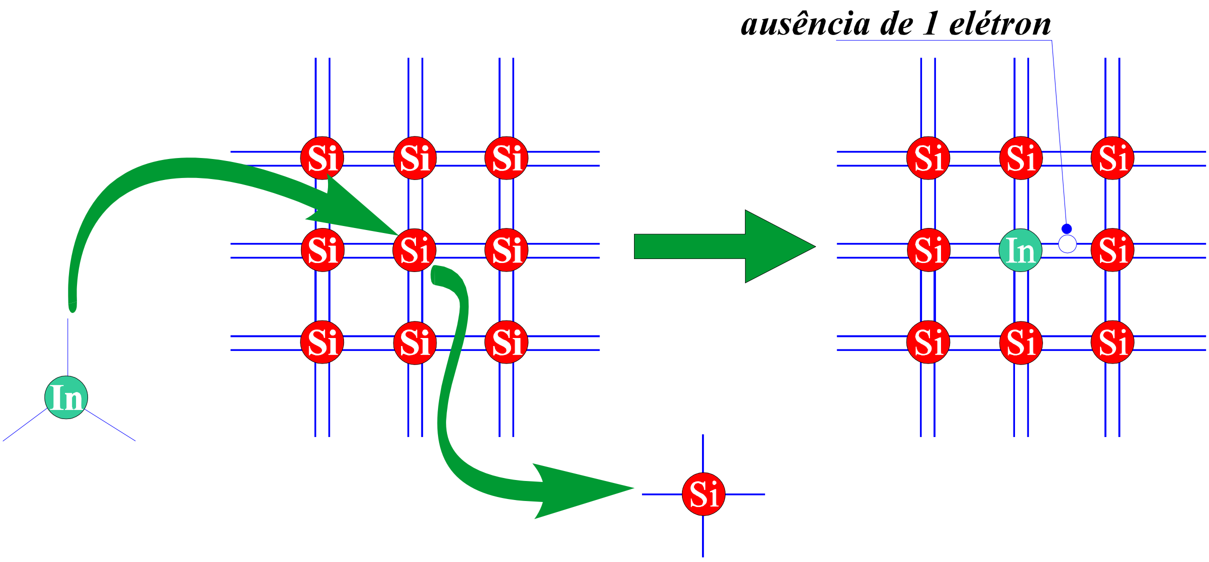


Fig.9 Dopagem de silício com átomo de índio.

Como se pode observar na **Fig.9**, o átomo de índio se acomoda na estrutura cristalina, formando três ligações covalentes com átomos vizinhos de silício. Com respeito à ligação com o quarto átomo de silício, verifica-se a ausência do segundo elétron que comporia o par necessário à formação daquela ligação com o átomo de índio. Essa ausência de elétron de ligação é denominada de **lacuna**.

A existência de lacunas no semicondutor permite que haja um mecanismo de condução distinto daquele observado em um semicondutor tipo *n*. No caso do semicondutor tipo *n*, os elétrons adicionais resultantes do processo de dopagem podem transitar livremente no interior do material. Por outro lado, quando a dopagem produz lacunas no semicondutor, um elétron proveniente de uma ligação covalente só poderá transitar para um ponto do cristal onde haja uma lacuna disponível.

Esse mecanismo de condução está ilustrado na **Fig.10**, onde se considera uma representação de um cristal de silício dopado com átomos de índio submetido a uma ddp.

O movimento de elétrons de valência se dá do pólo negativo para o pólo positivo, pela ocupação de lacunas disponíveis na rede cristalina. Nesse processo, cada elétron torna disponível uma nova lacuna em seu sítio de origem, como pode ser observado na representação da **Fig.10**.

Esse movimento de elétrons equivale portanto, a um movimento de lacunas do pólo positivo para o pólo negativo do material.

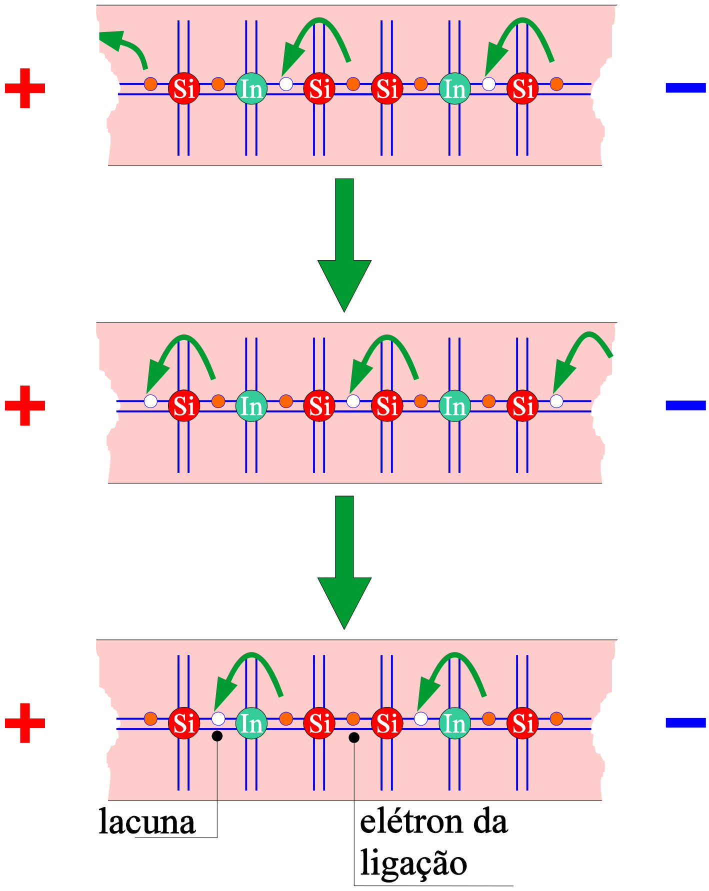


Fig.10 Movimento de lacunas em um semicondutor sujeito a uma ddp.

De acordo com esse ponto de vista, as lacunas em um semicondutor dopado se comportam efetivamente como cargas positivas que podem transitar em um cristal quando este está submetido a uma tensão externamente aplicada.

O semicondutor dopado com átomos contendo deficiência de um ou mais elétrons na camada de valência recebe a denominação de **semicondutor tipo *p***, pois nesses materiais a corrente elétrica é conduzida predominantemente por lacunas que se comportam como portadores de carga **positiva** durante o processo de condução elétrica.

Como no processo de condução elétrica de um semicondutor tipo *n*, o movimento de lacunas em um semicondutor tipo *p*, submetido a uma ddp, ocorre independentemente da polaridade da tensão aplicada entre as extremidades do material.

Analisando-se as propriedades básicas de semicondutores dopados, nota-se que o número de elétrons em um semicondutor tipo *n*, ou lacunas em um

semicondutor tipo *p*, cresce com o aumento do número de átomos de impurezas introduzidas no cristal. Com o aumento do número de portadores de carga, aumenta a condutividade elétrica do material. Dessa forma, torna-se possível alterar de forma controlada a condutividade elétrica de um semicondutor, efetuando-se a dosagem adequada da quantidade de dopagem do cristal durante a etapa de fabricação.

Essa característica de controle externo de condutividade possibilita o uso de cristais semicondutores como matéria prima na fabricação de componentes eletrônicos, incluindo diodos, transistores, circuitos integrados etc., bem como na construção de dispositivos optoeletrônicos, tais como fotodetetores, diodos emissores de luz e lasers semicondutores.

A condutividade elétrica de um semicondutor pode ser controlada pela dosagem adequada da quantidade de dopagem do cristal, durante a etapa de fabricação.

PROPRIEDADES TÉRMICAS

A temperatura exerce influência direta sobre as propriedades elétricas de materiais semicondutores. Quando a temperatura de um material semicondutor aumenta, o aumento de energia térmica do elétron de valência facilita a sua liberação da ligação covalente de que participa. Cada ligação covalente que se desfaz por esse processo propicia, portanto, a geração de um par elétron/lacuna a mais na estrutura do cristal, conforme ilustrado na **Fig.11**.

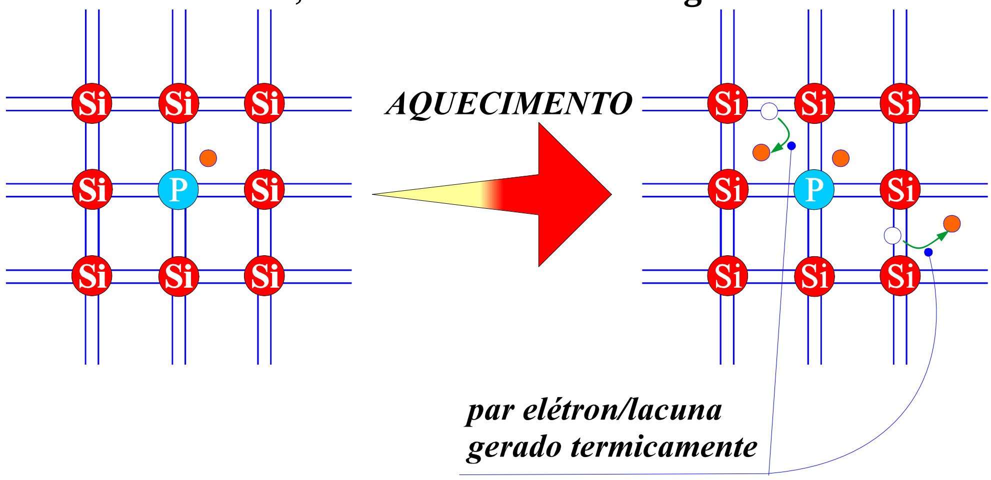


Fig.11 Geração por aquecimento de pares elétron/lacuna em um semicondutor.

O aumento do número de portadores devido ao aquecimento do cristal aumenta sua condutividade, permitindo assim que se obtenha um maior fluxo de corrente no material.

O diodo semicondutor

O diodo semicondutor é um componente que pode comportar-se como condutor ou isolante elétrico, dependendo da forma como a tensão é aplicada aos seus terminais. Essa característica permite que o diodo semicondutor possa ser utilizado em diversas aplicações, como, por exemplo, na transformação de corrente alternada em corrente contínua.

FORMAÇÃO DO DIODO - JUNÇÃO *pn*

Um diodo semicondutor é formado a partir da junção entre um semicondutor tipo *p* e um semicondutor tipo *n*, conforme ilustrado na **Fig.12**. Existem vários processos que permitem a fabricação desse tipo de estrutura e que utilizam técnicas altamente sofisticadas para o controle de crescimento dos cristais semicondutores com os graus de dopagens desejados. A estrutura formada recebe a denominação de **junção *pn***.

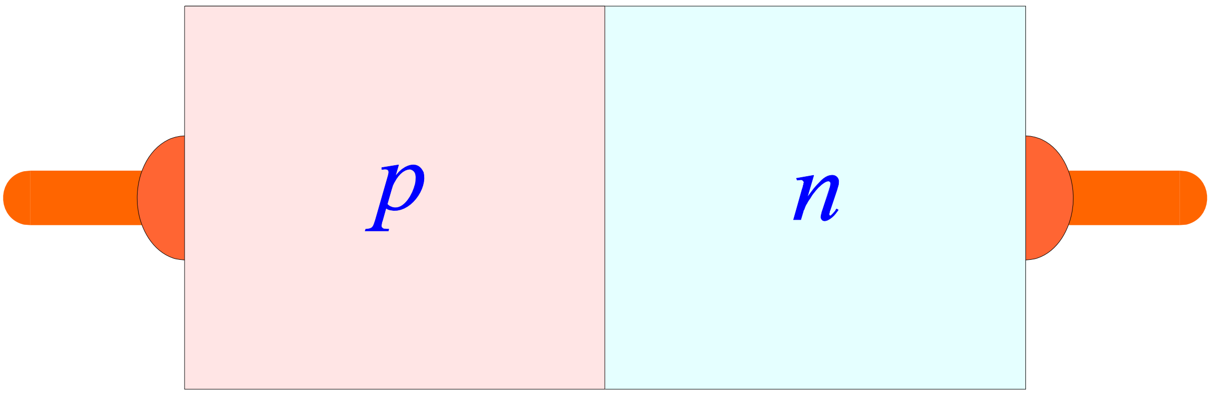


Fig.12 Diodo semicondutor.

Conforme ilustrado na **Fig.13**, logo após a formação da junção *pn*, alguns elétrons livres se difundem do semicondutor tipo *n* para o semicondutor tipo *p*. O mesmo processo ocorre com algumas lacunas existentes no semicondutor tipo *p* que difundem para o semicondutor tipo *n*.

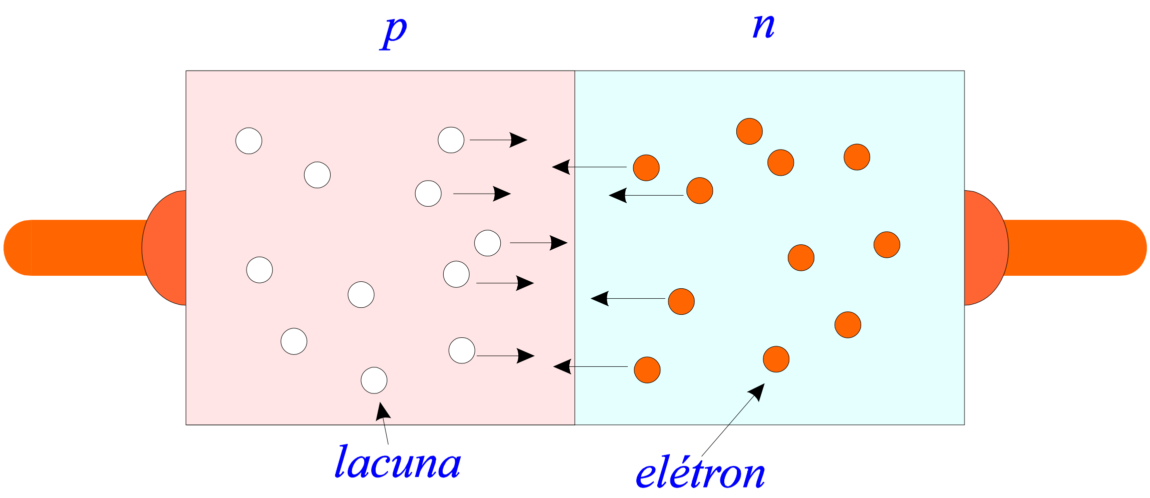


Fig.13 Difusão de elétrons e lacunas logo após a formação da junção *pn*.

Durante o processo de difusão, parte dos elétrons livres se recombinam com lacunas na região próxima à junção. A diminuição do número de elétrons livres existentes inicialmente do lado *n* que conseguiram se difundir e recombinar com as lacunas no lado *p*, produz uma região de cargas positivas do lado *n* e negativas do lado *p* da junção.

Conforme ilustrado na **Fig.14**, as cargas produzidas nas proximidades da junção são cargas fixas à rede cristalina. Essa região de cargas próxima à junção é denominada **região de cargas descobertas** ou **região de depleção**.

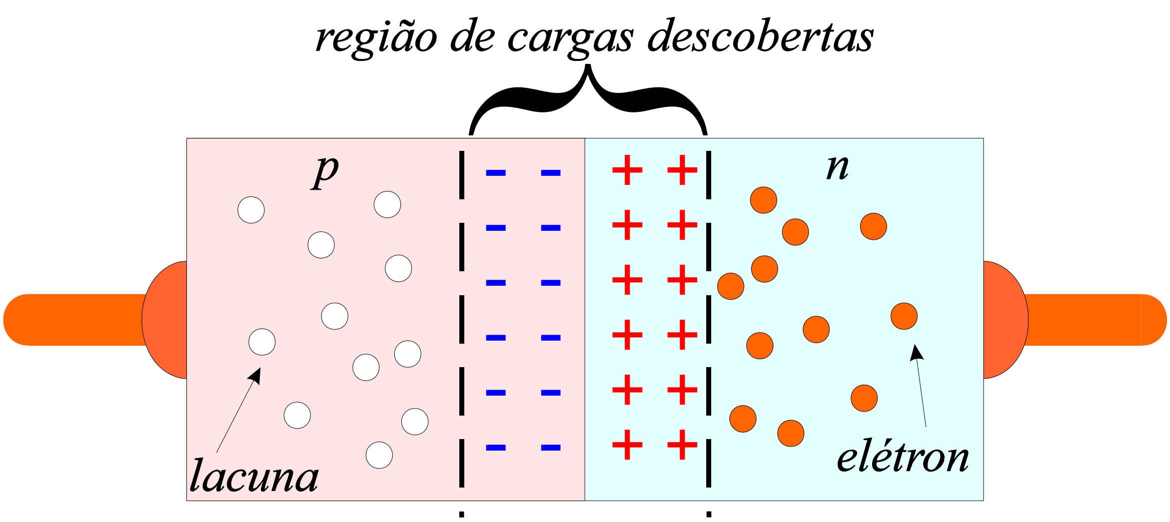


Fig.14 Região de cargas descobertas nas proximidades da junção *pn*.

Com o aparecimento da região de depleção, o transporte de elétrons para o lado *p* é bloqueado, pois estes são repelidos da região negativamente carregada do lado *p*. O mesmo efeito se aplica para lacunas cujo transporte para o lado *n* é repelido pelas cargas positivas existentes no lado *n* da junção.

Portanto, imediatamente após a formação da junção, uma diferença de potencial positiva é gerada entre os lados *n* e *p*. Essa **barreira de potencial** previne a continuação do transporte de portadores através da junção *pn* não polarizada.

Imediatamente após a formação da junção pn, aparece uma barreira de potencial que é positiva do lado n e negativa do lado p da junção.

A tensão V_B proporcionada pela barreira de potencial no interior do diodo, depende do material utilizado na sua fabricação. Valores aproximados para os diodos de germânio e silício são V_B = 0,3 V e V_B = 0,7 V, respectivamente.

Não é possível medir diretamente o valor de V_B aplicando um voltímetro conectado aos terminais do diodo, porque essa tensão existe apenas em uma pequena região próxima à junção. No todo, o componente é eletricamente neutro, uma vez que não foram acrescentados nem retirados portadores do cristal.

ASPECTO E REPRESENTAÇÃO DO DIODO

O diodo semicondutor é representado em diagramas de circuitos eletrônicos pelo símbolo ilustrado na **Fig.15.** O terminal da seta representa o material *p*, denominado de **ânodo** do diodo, enquanto o terminal da barra representa o material *n*, denominado de **cátodo** do diodo.

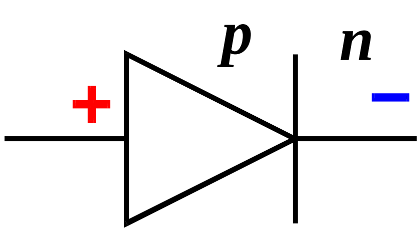


Fig.15 Representação do diodo.

A identificação dos terminais do componente real pode aparecer na forma de um símbolo impresso sobre o corpo do componente ou alternativamente, o cátodo do diodo pode ser identificado através de um anel impresso na superfície do componente, conforme ilustrado na **Fig. 16**.

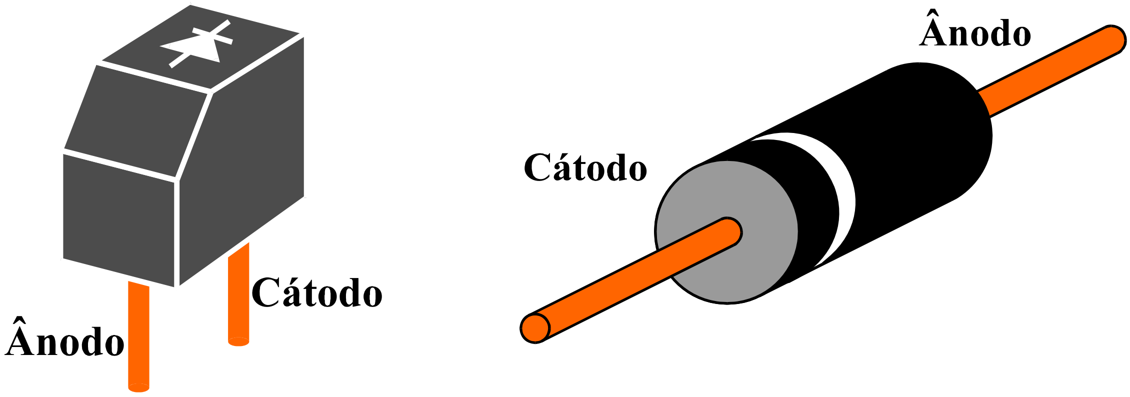


Fig.16 Formas de identificação dos terminais do diodo semicondutor para dois tipos comuns de encapsulamento.

Observa-se que o comportamento de qualquer componente eletrônico depende diretamente da sua temperatura de trabalho. Essa **dependência térmica** é um fator importante que deve ser considerado quando se projeta ou se montam circuitos com esses componentes.

APLICAÇÃO DE TENSÃO SOBRE O DIODO

A aplicação de tensão sobre o diodo estabelece a forma como o componente se comporta eletricamente. A tensão pode ser aplicada ao diodo pela **polarização direta** ou pela **polarização inversa** do componente, conforme examinado a seguir.

POLARIZAÇÃO DIRETA

Polarização direta é uma condição que ocorre quando o lado *p* é submetido a um potencial positivo relativo ao lado *n* do diodo, conforme ilustrado na **Fig. 17**.

Nessa situação, o pólo positivo da fonte repele as lacunas do material *p* em direção ao pólo negativo, enquanto os elétrons livres do lado *n* são repelidos do pólo negativo em direção ao pólo positivo.

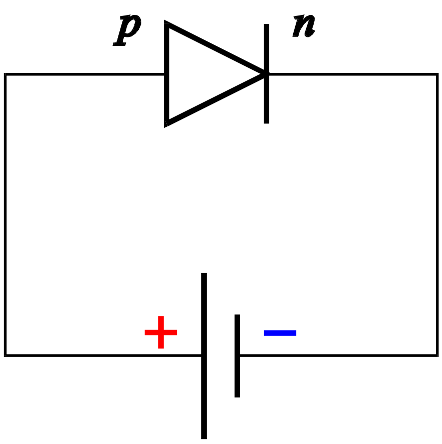


Fig.17 Diodo submetido à polarização direta.

Na situação ilustrada na **Fig.18,** o valor da tensão aplicada ao diodo é inferior ao valor V_B da barreira de potencial. Nessa condição, a maior parte dos elétrons e lacunas não têm energia suficiente para atravessar a junção.

Como resultado, apenas alguns elétrons e lacunas têm energia suficiente para penetrar a barreira de potencial, produzindo uma pequena corrente elétrica através do diodo.

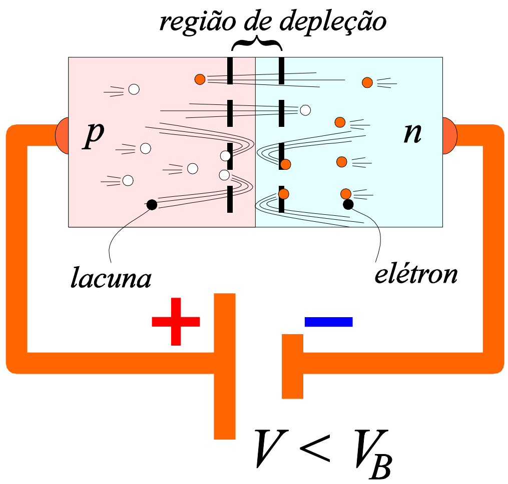


Fig.18 Diodo sob polarização direta para $V<V_B$.

Se a tensão aplicada aos terminais do diodo excede o valor da barreira de potencial, lacunas do lado *p* e elétrons do lado *n* adquirem energia superior àquela necessária para superar a barreira de potencial, produzindo como resultado um grande aumento da corrente elétrica através do diodo, como mostrado na **Fig. 19**.

Quando o diodo está polarizado diretamente, conduzindo corrente elétrica sob a condição $V > V_B$, diz-se que **o diodo está em condução**.

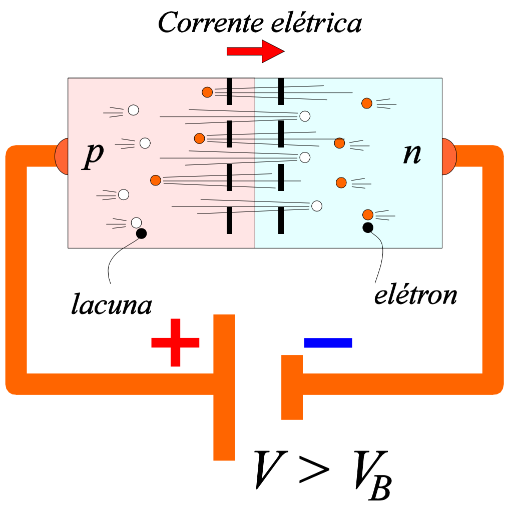


Fig.19 Diodo sob polarização direta para $V > V_B$.

Um diodo está em condução quando polarizado diretamente sob a condição $V > V_B$.

POLARIZAÇÃO INVERSA

A polarização inversa de um diodo ocorre quando o lado *n* fica submetido a um potencial positivo relativo ao lado *p* do componente, como mostrado na **Fig.20**.

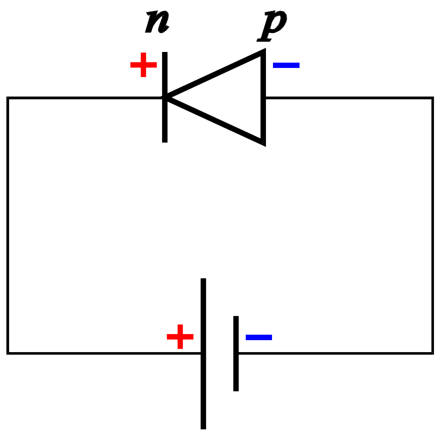


Fig.20 Diodo sob polarização inversa.

Nessa situação, os pólos da fonte externa atraem os portadores livres majoritários em cada lado da junção; ou seja, elétrons do lado *n* e lacunas do lado *p* são afastados das proximidades da junção, conforme ilustrado na **Fig.21**.

Com o afastamento dos portadores majoritários, aumenta não só, a extensão da região de cargas descobertas, como também o valor da barreira de potencial através da junção.

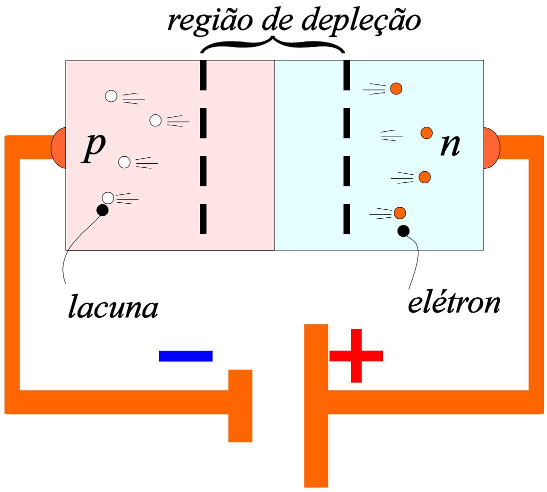


Fig.21 Região de depleção de um diodo sob polarização inversa.

Com o aumento da barreira de potencial, torna-se mais difícil o fluxo, através da junção, de elétrons injetados pela fonte no lado *p* e de lacunas no lado *n*. Como resultado, a corrente através do diodo tende praticamente a um valor nulo.

Quando o diodo está sob polarização inversa, impedindo o fluxo de corrente através de seus terminais, diz-se que **o diodo está em bloqueio ou na condição de corte**.

Um diodo inversamente polarizado bloqueia o fluxo de corrente elétrica.

CARACTERÍSTICA ELÉTRICA DO DIODO SEMICONDUTOR

É sempre conveniente modelar um determinado componente eletrônico através de seu **circuito equivalente**. O circuito equivalente é uma ferramenta largamente utilizada em eletrônica para representar um componente com características não comuns, por um circuito consistindo de componentes mais simples, tais como interruptores, resistores, capacitores etc.

No caso do diodo semicondutor, o circuito equivalente se torna bastante simplificado quando o diodo é considerado ideal, conforme descrito a seguir.

O DIODO SEMICONDUTOR IDEAL

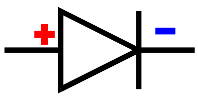
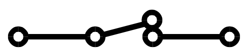
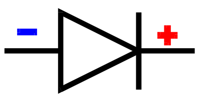
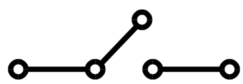
Por diodo ideal entende-se um dispositivo que apresenta características ideais de condução e bloqueio.

Um diodo ideal, polarizado diretamente, deve conduzir corrente elétrica sem apresentar resistência, comportando-se como um interruptor fechado, como ilustrado na segunda linha da **Tabela 1**. O interruptor fechado é, portanto, o circuito equivalente para o diodo ideal em condução.

Polarizado inversamente, o diodo semicondutor ideal deve comportar-se como um isolante perfeito, impedindo completamente o fluxo de corrente. O interruptor aberto ilustrado na terceira linha da **Tabela 1** é, portanto, o circuito equivalente para o diodo ideal na condição de corte.

Em resumo, o diodo ideal comporta-se como um interruptor, cujo estado é controlado pela tensão aplicada aos seus terminais.

Tabela 1 Circuitos equivalentes para o diodo ideal.

Estado	Polarização	Circuito equivalente
Condução		
Bloqueio		

MODELO SEMI-IDEAL DO DIODO SEMICONDUTOR

O diodo ideal é um modelo simplificado do diodo real, pois naquele modelo alguns parâmetros relacionados à fabricação e às propriedades de materiais semicondutores são desprezados. Modelos mais realísticos do diodo operando em condução ou em bloqueio são descritos a seguir.

Diodo em condução

Com respeito às características de condução do diodo semicondutor, deve-se levar em conta que o diodo entra em condução efetiva apenas a partir do momento em que a tensão da fonte externa atinge um valor ligeiramente superior ao valor V_B da barreira de potencial.

Deve-se também considerar a existência de uma resistência elétrica através da junção quando o diodo está sob polarização direta. Essa resistência existe em qualquer semicondutor, devido a colisões dos portadores com a rede cristalina do material. O valor da resistência interna dos diodos em estado de condução é normalmente inferior a 1Ω.

Assim, um modelo mais aprimorado para o circuito equivalente do diodo em condução pode ser obtido pela associação série de um resistor R_c, representativo da resistência direta de condução, com uma fonte de tensão V_B correspondente ao valor da barreira de potencial na junção, como mostrado na **Fig.22**.

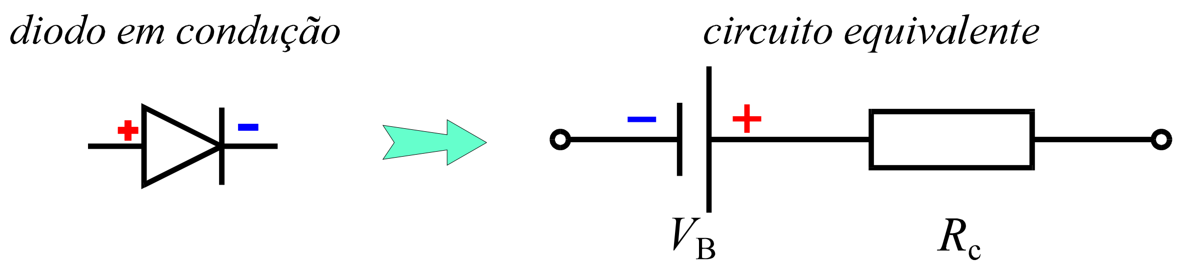
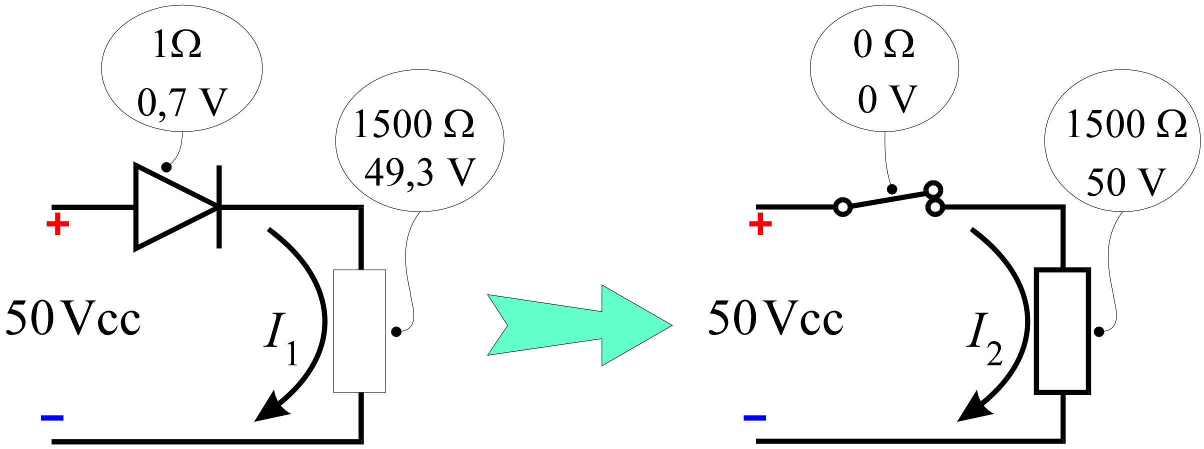


Fig.22 Modelo semi-ideal do diodo semicondutor em condução.

Em situações em que o diodo é utilizado em série com componentes que exibem resistências muito superiores à sua resistência de condução, esta pode ser desprezada e o diodo pode ser considerado como ideal, sem que se incorra em um erro significativo.

No circuito da **Fig.23**, por exemplo, o valor da resistência externa é 1.500 vezes superior à resistência de condução do diodo, e o erro relativo cometido no

cálculo da corrente do circuito ao se considerar o diodo como ideal é de apenas 1,5%.



$$I_1 = \frac{49,3}{1501}(V/\Omega) = 0,0328A \qquad I_2 = \frac{50}{1500}(V/\Omega) = 0,0333A$$

$$\text{Erro relativo}(\%) = \frac{I_2 - I_1}{I_1} \times 100 = \frac{0.0333 - 0.0328}{0,0328} \times 100 = \frac{0.0005}{0.0328} \times 100 = 1,5\%$$

Fig.23 Circuito com diodo submetido a condução e cálculo do erro cometido ao se utilizar o diodo ideal como modelo.

Diodo em bloqueio

Efeitos associados à **temperatura e a absorção de fótons** nas proximidades da junção de um diodo, possibilitam a geração de uma pequena quantidade de **portadores minoritários**, ou mais precisamente, lacunas no lado *n* e elétrons livres no lado *p*. Conseqüentemente, sempre existe uma **corrente de fuga**, quando o diodo é inversamente polarizado, correspondendo à passagem de portadores minoritários através da junção. Essa corrente de fuga é geralmente da ordem de alguns microampères, o que indica que a resistência da junção inversamente polarizada pode chegar a vários megahoms.

O diodo em bloqueio pode, portanto, ser modelado a partir do circuito equivalente mostrado na **Fig.24**.

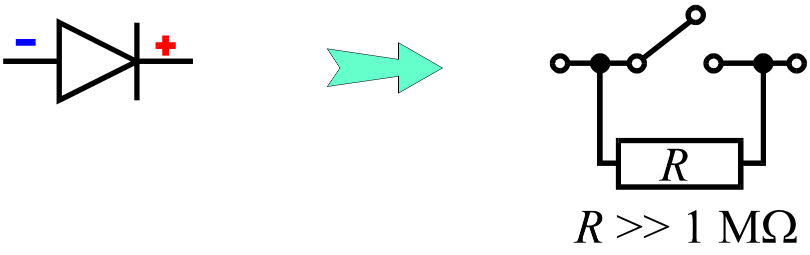


Fig.24 Circuito equivalente para o diodo em bloqueio.

CURVA CARACTERÍSTICA DO DIODO

O comportamento de qualquer componente eletrônico pode ser expresso através de uma **curva característica** ou **curva *VI*** que representa a relação entre tensão e corrente através dos terminais do componente. Dessa forma, para cada valor da tensão aplicada, pode-se, a partir dos dados da curva característica, obter o valor da corrente que flui no dispositivo e vice-versa. A curva característica do diodo serve para determinar seu comportamento real qualquer que seja o seu estado de polarização, conforme examinado a seguir.

Região de condução

Durante a condução, uma corrente I_d flui através do diodo, conforme ilustrado na **Fig.25**. A medida que aumenta a corrente injetada I_d, a queda de tensão V_d, observada através dos terminais do diodo, aumenta muito pouco em relação ao valor V_B, como conseqüência do baixíssimo valor da resistência de condução do diodo.

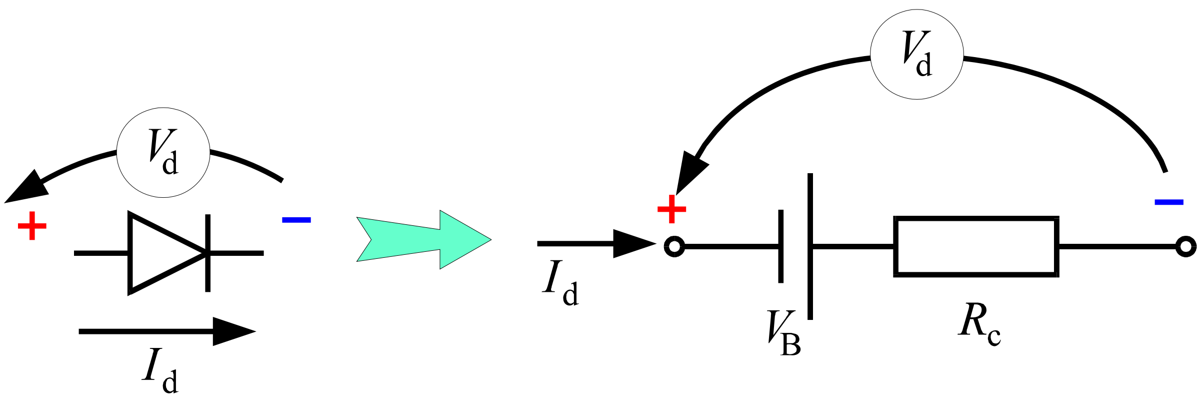


Fig.25 Modelo do diodo no regime de condução e parâmetros utilizados na definição da curva característica.

Uma representação gráfica dessa relação tensão×corrente para o caso do diodo de silício é mostrada na **Fig.26.** Nessa representação, a curva característica do diodo é obtida simplesmente pela união de todos os pontos representativos dos pares de valores possíveis de corrente I_d e tensão V_d, através do diodo no regime de condução.

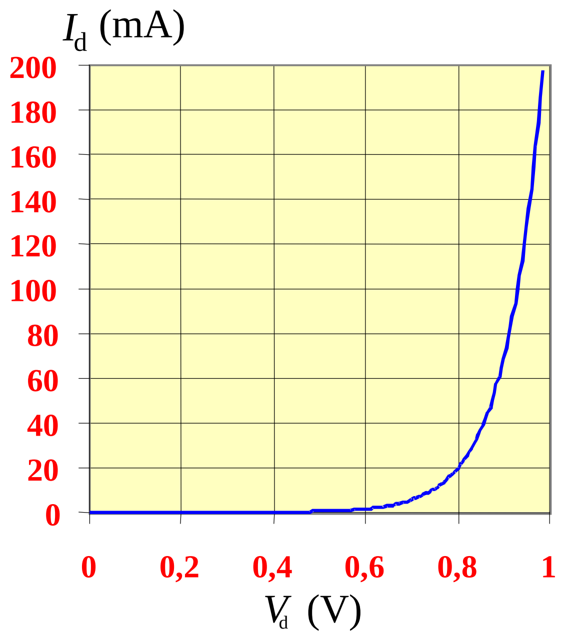


Fig.26 Curva característica do diodo de silício no regime de condução.

A obtenção do valor de tensão V_0 que corresponde a um dado valor de corrente I_0, é feita conforme ilustrado na **Fig.27**. Deve-se traçar inicialmente uma linha horizontal a partir do ponto sobre o eixo vertical correspondente ao valor I_0. Essa linha intercepta a curva no ponto *P* indicado na **Fig.27**. Traçando-se a partir de *P* uma linha vertical, obtém-se a interseção com o eixo horizontal no ponto V_0 que é o valor desejado da queda de tensão nos terminais do diodo.

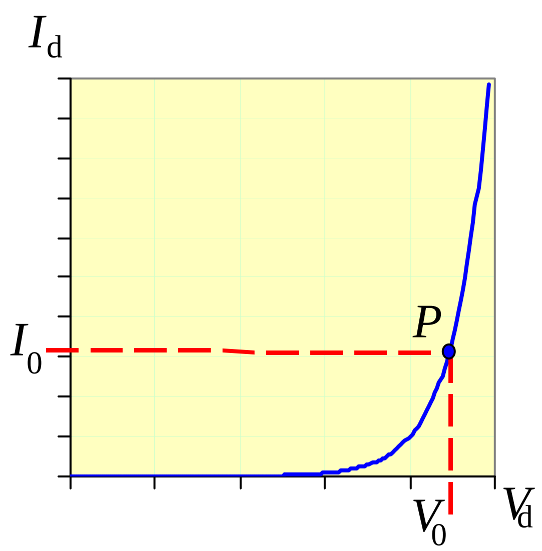


Fig.27 Representação de um par de valores de tensão e de corrente na curva característica.

Através da curva verifica-se também que, enquanto a tensão sobre o diodo não ultrapassa um valor limite, que corresponde ao potencial da barreira V_B, a corrente através do diodo permanece muito pequena. Essa condição está indicada na **Fig.28**, para um tipo de diodo de silício, onde I_d < 6 mA para V_d < 0,7 V. A partir do valor limite V_B = 0,7 V, a corrente através do diodo pode aumentar substancialmente sem que isso cause um aumento significativo na queda de tensão através do diodo. Verifica-se, portanto, que na faixa de valores V_d > 0,7 V, o diodo comporta-se praticamente como um resistor de baixíssima resistência.

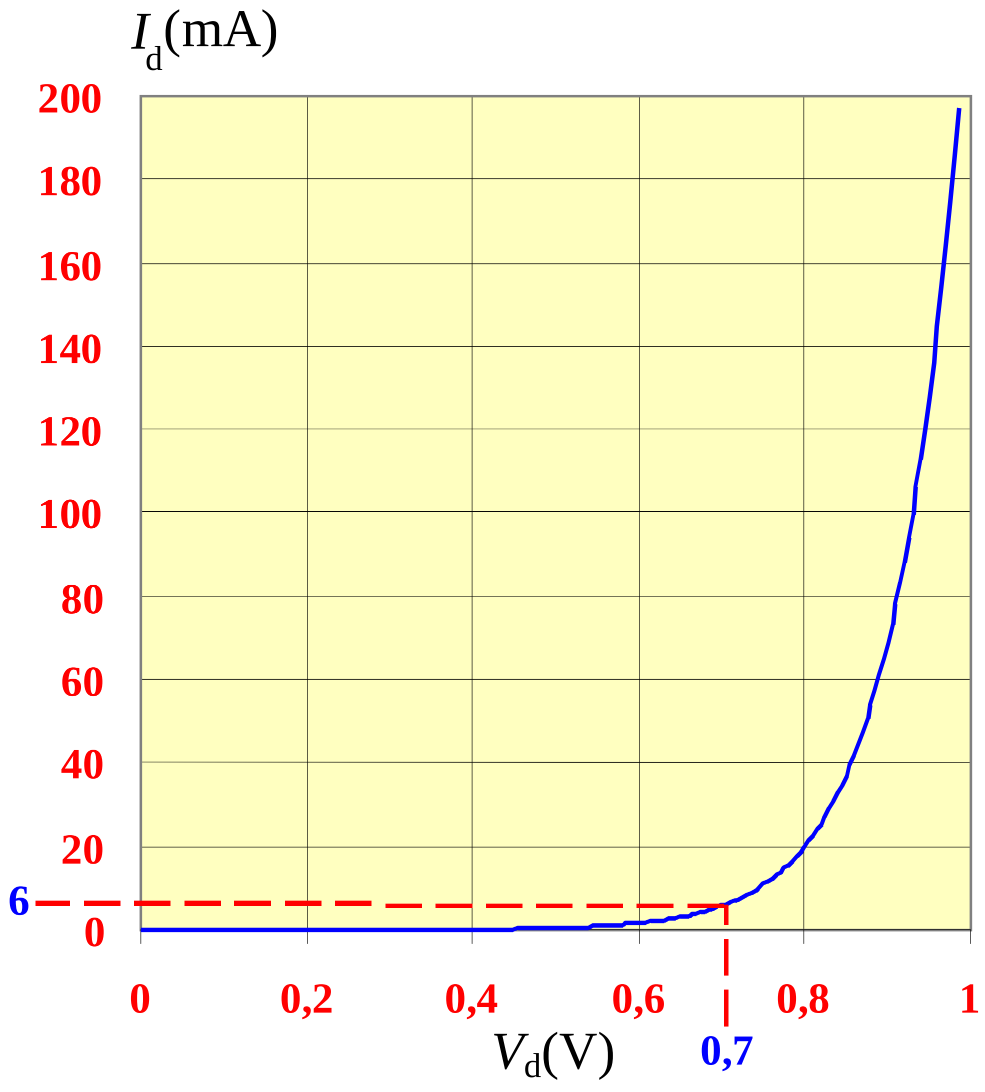


Fig.28 Curva característica para um tipo comum de diodo de silício.

Região de bloqueio

Como discutido anteriormente, existe uma corrente de fuga quando o diodo é inversamente polarizado. Essa corrente de fuga aumenta gradativamente com o aumento da tensão inversa nos terminais do diodo. Esse comportamento pode ser observado na região de tensões e correntes negativas do gráfico da curva característica mostrado na **Fig.29**. Note-se que, para este tipo de diodo de silício, a corrente de fuga **satura** no valor de 1 microampère negativo.

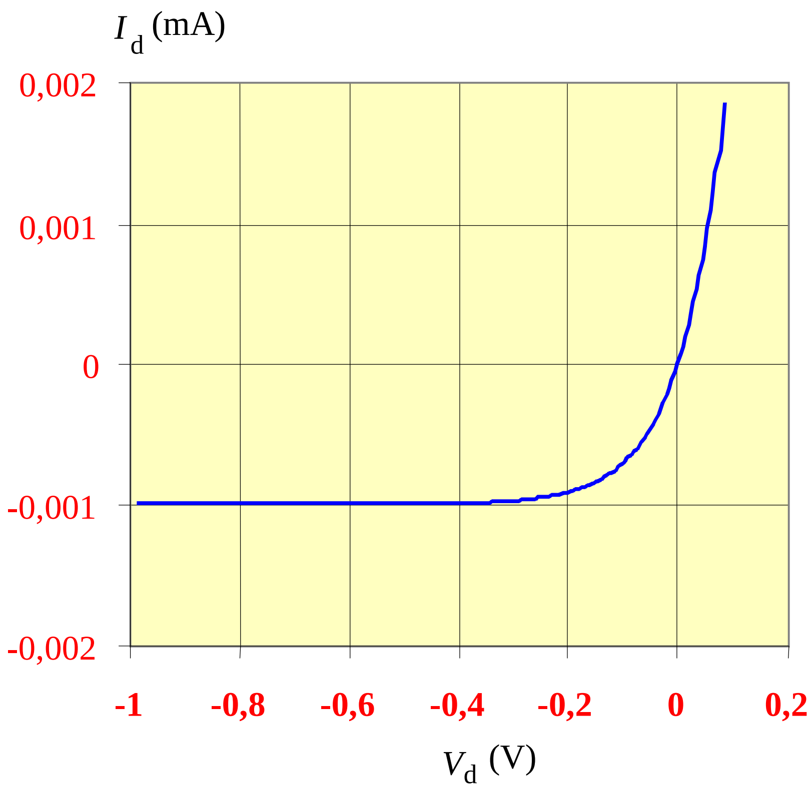


Fig.29 Gráfico exibindo a porção da curva característica em que o diodo é inversamente polarizado.

Como em polarização direta a corrente é tipicamente mais de 1.000 vezes superior ao valor da corrente de polarização inversa, a representação das duas regiões de operação em um mesmo gráfico é geralmente feita utilizando-se a escala de mA na região de tensões positivas, e a escala de µA na região de tensões negativas. Essa forma de representação está ilustrada na **Fig.30**, para um tipo comum de diodo de silício, onde se pode visualizar detalhadamente o comportamento da curva característica em ambos os regimes de operação.

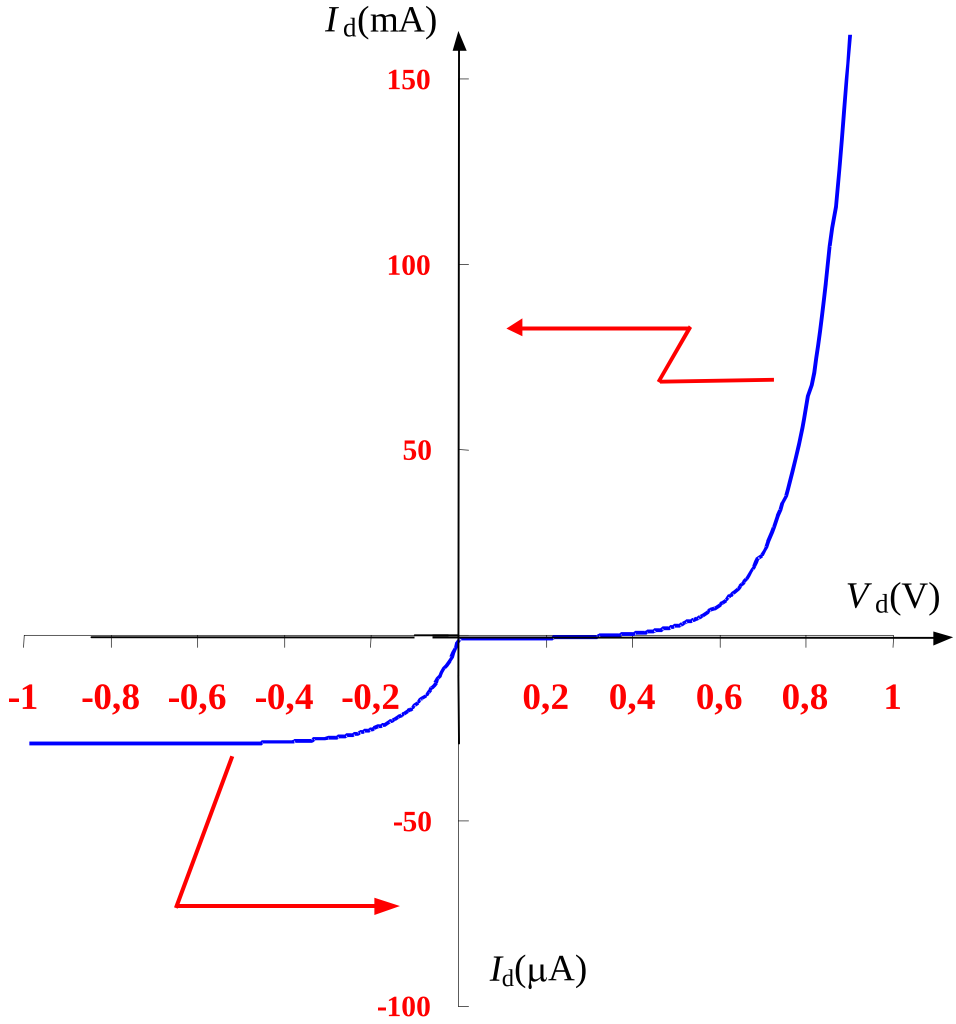


Fig.30 Curva característica de um diodo de silício com escala vertical dupla para detalhar os regimes de polarização direta e inversa.

LIMITES DE OPERAÇÃO DO DIODO

Os limites de operação do diodo em *cc* estabelecem os valores máximos de tensão e corrente que podem ser aplicados ao componente em circuitos de corrente contínua, sem provocar danos a sua estrutura.

Analisando o comportamento do diodo no regime de condução, verifica-se que a corrente de condução é o fator diretamente influenciado pelo circuito de alimentação do diodo. A queda de tensão nos terminais do diodo no regime de condução é praticamente independente do circuito, mantendo-se em um valor próximo ao valor do potencial da barreira do dispositivo, ou seja, 0,7 V para o silício e 0,3 V para o germânio.

No regime de polarização inversa, a tensão através do diodo é o parâmetro diretamente influenciado pelo circuito de alimentação. A corrente de fuga não é muito influenciada pelo circuito externo pois depende apenas das propriedades materiais do diodo.

Dessa forma, os limites de operação do diodo são definidos pela **corrente de condução máxima** e **tensão inversa máxima** descritas a seguir.

Corrente de condução máxima

A corrente máxima de condução de um diodo é fornecida pelo fabricante em um folheto de especificações técnicas. Nesses folhetos, a corrente máxima de condução aparece designada pela sigla I_F, com a abreviação *F* simbolizando a palavra inglesa *forward* que significa *para a frente*, *direto(a)* etc. Na **Tabela 2** são especificados valores de I_F para dois tipos comerciais de diodos.

Tabela 2 Valores de I_F para dois diodos.

TIPO	I_F
SKE 1/12	1,0 A
1n4004	1,0 A

Tensão inversa máxima

Sob polarização inversa, o diodo opera no regime de bloqueio. Nessa condição, praticamente toda tensão externamente aplicada atua diretamente entre os terminais do diodo, conforme ilustrado na **Fig.31**.

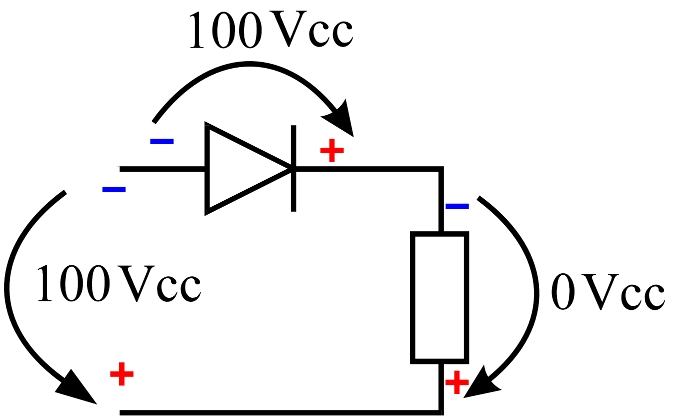


Fig.31 Circuito alimentando diodo sob polarização inversa.

Cada diodo tem a estrutura preparada para suportar um determinado valor máximo da tensão inversa. A aplicação de um valor de tensão inversa **superior** àquele especificado pelo fabricante, provoca um aumento significativo da corrente de fuga suficiente para danificar o componente.

Os fabricantes de diodos fornecem nos folhetos de especificação o valor da tensão inversa máxima que o diodo suporta sem sofrer ruptura. Esse valor é designado por V_R. Na **Tabela 3** estão listadas as especificações de alguns diodos comerciais com os respectivos valores do parâmetro V_R.

Tabela 3 Especificações de diodos e tensões inversas máximas correspondentes.

TIPO	V_R
1N4001	50 V
BY127	800 V
BYX13	50 V
SKE1/12	1.200 V

TESTE DE DIODOS SEMICONDUTORES

As condições de funcionamento de um diodo podem ser verificadas pela medição da resistência através de um multímetro.

Os testes realizados para determinar as condições de um diodo resumem-se a uma verificação da resistência do componente nos sentidos de condução e bloqueio, utilizando a tensão fornecida pelas baterias do ohmímetro. Entretanto, existe um aspecto importante com relação ao multímetro que deve ser considerado ao se testarem componentes semicondutores:

Existem alguns multímetros que, quando usados como ohmímetros, têm polaridade real invertida com relação à polaridade indicada pelas cores das pontas de prova.

Isso implica que, para estes multímetros:

Ponta de prova preta	⇒	**Terminal positivo**
Ponta de prova vermelha	⇒	**Terminal negativo**

Para realizar o teste com segurança deve-se utilizar um multímetro cuja polaridade real das pontas de prova seja conhecida ou consultar o esquema do multímetro para determinar as polaridades reais.

EXECUÇÃO DO TESTE

Para determinar se o diodo está defeituoso, não é necessário identificar os terminais do ânodo e do cátodo. Basta apenas conectar as pontas de prova do multímetro aos terminais do diodo e alterná-las para verificar o comportamento do diodo quanto às duas polaridades possíveis.

A seguir são descritos possíveis testes de diodos que podem ser realizados com o multímetro.

Diodo em boas condições: O ohmímetro deve indicar baixa resistência para um sentido de polarização e alta resistência ao se inverterem as pontas de prova nos terminais do diodo, conforme ilustrado na **Fig.32**.

Diodo em curto: Se as duas leituras indicarem baixa resistência, o diodo está em curto, conduzindo corrente elétrica nos dois sentidos.

Diodo aberto (interrompido eletricamente): Se as duas leituras indicarem alta resistência o diodo está em aberto, bloqueando a passagem de corrente elétrica nos dois sentidos .

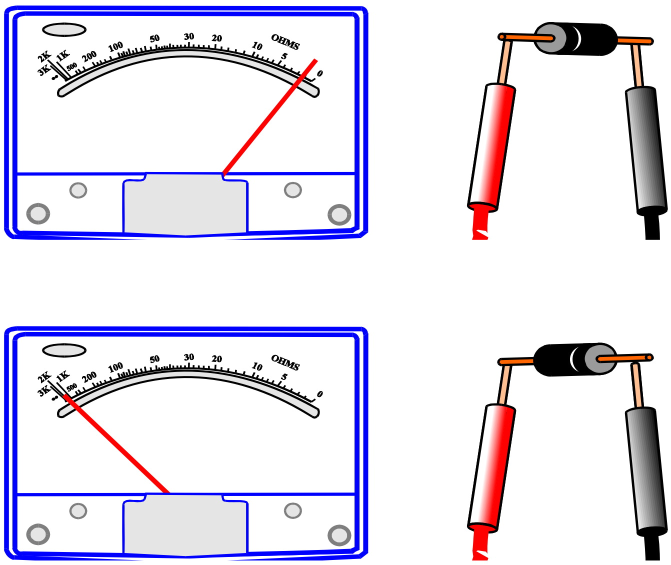


Fig.32 Teste das condições do diodo com um multímetro. Neste exemplo, o diodo está em boas condições e a cor vermelha corresponde à polaridade positiva.

Identificação do ânodo e cátodo de um diodo: Em muitas ocasiões, a barra de identificação do cátodo no corpo de um diodo pode estar apagada. Nessas situações, os terminais do diodo poderão ser identificados com auxílio do

multímetro. O diodo exibe baixa resistência quando a ponta de prova com a polaridade real positiva é conectada ao ânodo. Basta, portanto, testar o diodo conectando-se as pontas de prova nas duas posições possíveis. Quando o multímetro indicar baixa resistência, o seu ânodo estará conectado à ponta de prova com polaridade real positiva.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Qual a característica elétrica de um material semicondutor?

2. Quais são as duas formas naturais do carbono puro e quais as suas características?

3. Quantos elétrons de valência possuem os seguintes compostos: (a) germânio, (b) silício, (c) arsênio e (d) fósforo.

4. Qual a característica elétrica de cristais puros formados por átomos tetravalentes?

5. O que é a dopagem de um semicondutor?

6. O que são um semicondutores tipo *n* e tipo *p*?

7. Que átomos de impureza são utilizados na dopagem do silício para formar um semicondutor tipo *p*? E para formar um semicondutor tipo *n*?

8. O que são lacunas em um semicondutor?

9. De que forma a temperatura altera a condutividade elétrica de um semicondutor?

10. O que ocorre imediatamente após a formação de uma junção *pn*?

11. Sob que condições um diodo entra em condução ou em bloqueio?

12. Quais os circuitos equivalentes referentes ao diodo ideal e semi-ideal?

13. Qual o valor típico de tensão que deve ser aplicada a um diodo de germânio para que ele conduza? E para o diodo de silício?

BIBLIOGRAFIA

ARNOLD, Roberts & BRANDT, Hans. Retificadores semicondutores não controlados. São Paulo, E. P. U., 1975, 49p. il. (Eletrônica Industrial, 1).

CIPELLI, Antônio Marco Vicari & SANDRINI, Waldir João. Teoria e desenvolvimento de projetos de circuitos eletrônicos. 8.ª ed., São Paulo, Érica, 1984, 580p. il.

SENAI/DN. Reparador de circuitos eletrônicos; Eletrônica Básica II. Rio de Janeiro, Divisão de Ensino e Treinamento , 1979 (Coleção Básica SENAI, Módulo 1).

TRAINING PUBLICATIONS DIVISION OF PERSONEL PROGRAM SUPPORT ACTIVITY. Curso de eletrônica. São Paulo, Hemus, c1975, 178p.

MILLMAN, Jacob e HALKIAS, Christos C., Integrated electronics: analog and digital circuits and systems, São Paulo, McGraw-Hill, 1972.

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Introdução

Muitos aparelhos eletrônicos operam no regime de corrente contínua. Para que seja possível alimentar tais aparelhos é necessário o emprego de circuitos capazes de transformar corrente alternada em corrente contínua. Circuitos com essa capacidade são genericamente denominados de retificadores.

Existem vários tipos de circuito retificador, dentre os quais o mais simples é o circuito retificador de meia onda, cujo princípio básico de operação será analisado neste fascículo.

Embora o circuito retificador de meia onda tenha aplicações muito limitadas, a compreensão do seu funcionamento é indispensável para o estudo de circuitos mais sofisticados, como aqueles utilizados em televisores, rádios e outros equipamentos eletrônicos.

Para a boa compreensão do conteúdo e desenvolvimento das atividades contidas neste fascículo, o leitor deverá estar familiarizado com os conceitos relativos a:

* Corrente contínua.
* Corrente alternada.
* Diodo semicondutor.
* Transformadores.

Retificação de meia onda

Retificação é o nome dado ao processo de transformação de corrente alternada (*ca*) em corrente contínua (*cc*). Esse processo é utilizado com a finalidade de permitir que equipamentos de corrente contínua sejam alimentados a partir da rede elétrica que é disponível apenas na forma de corrente alternada.

A **retificação de meia onda** é um processo de transformação de *ca* em *cc*, que permite o aproveitamento de apenas um semiciclo da tensão de alimentação da carga, conforme ilustrado na **Fig.1**.



Fig.1 Diagrama ilustrando o princípio de operação do circuito retificador de meia onda.

O circuito retificador de meia onda com diodo é empregado em equipamentos que, apesar de exigirem uma tensão de alimentação unipolar, não necessitam que a mesma permaneça constante como função do tempo como, por exemplo, nos carregadores de bateria.

RETIFICAÇÃO DE MEIA ONDA COM DIODO SEMICONDUTOR

As características de condução e bloqueio do diodo semicondutor podem ser utilizadas para obter uma retificação de meia onda a partir da corrente alternada da rede elétrica domiciliar. A configuração básica desse tipo de circuito é ilustrada na **Fig.2** e o comportamento da tensão na carga em cada semiciclo da tensão de alimentação é descrito a seguir.

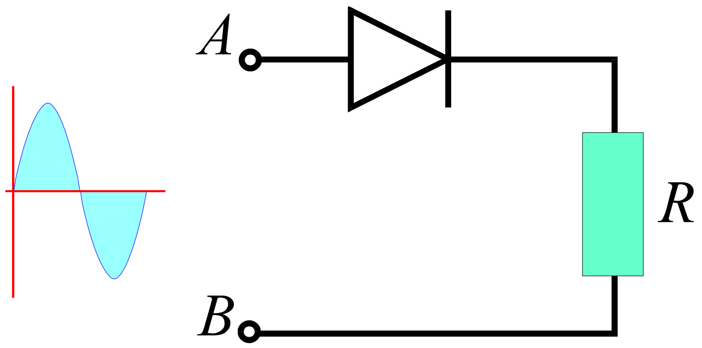


Fig.2 Circuito retificador de meia onda com diodo semicondutor.

SEMICICLO POSITIVO

Com base na **Fig.3**, a tensão no ponto *A* é positiva com relação ao ponto *B*, durante o semiciclo positivo. Com esta polaridade da tensão de entrada, o diodo entra no regime de condução, permitindo portanto a circulação de corrente.

Nessas condições, a tensão na carga assume uma forma próxima àquela da tensão de entrada, como pode ser observado na **Fig.3**.

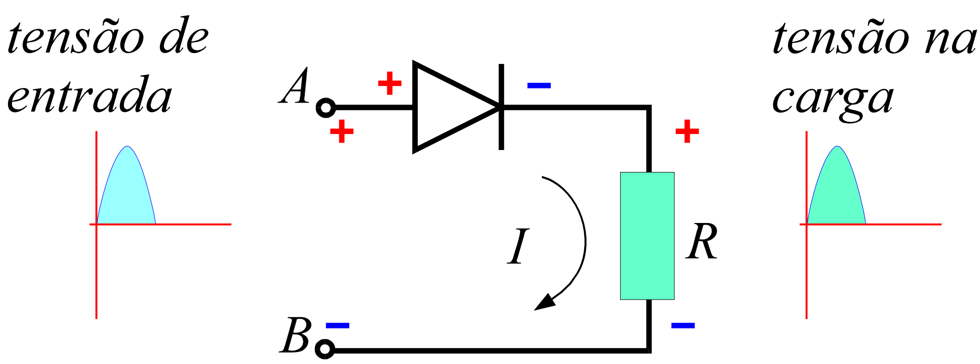


Fig.3 Alimentação da carga durante o semiciclo positivo da tensão de entrada.

No entanto, um exame mais minucioso da operação daquele circuito durante o semiciclo positivo mostra que existe uma pequena diferença entre as duas formas de tensão, conforme pode-se observar na **Fig.4**. Note-se que o diodo só entra efetivamente em condução a partir do instante de tempo em que a tensão de entrada supera o potencial de barreira V_B. A partir desse momento, a tensão no diodo mantém-se próxima ao valor V_B até o instante de tempo em que, após começar a decrescer, torna-se menor do que o valor V_B.

Sob essas condições, existirão dois pequenos intervalos de tempo, um no início e outro no fim do semiciclo positivo, durante os quais a tensão na carga é nula. Fora desses intervalos, a tensão de entrada supera o valor V_B e a tensão na carga assume uma forma próxima à tensão de entrada.

Vale também notar, conforme pode ser observado na **Fig.4**, que o valor máximo da tensão na carga é menor que o valor máximo da tensão de entrada, por uma quantidade igual à queda de tensão sobre o diodo no regime de condução. Esse valor é da ordem de 0,7 V para o diodo de silício. Em situações em que a condição $V_{máx} >> V_B$ é satisfeita, a diferença entre as duas formas de tensão se torna desprezível durante o semiciclo positivo.

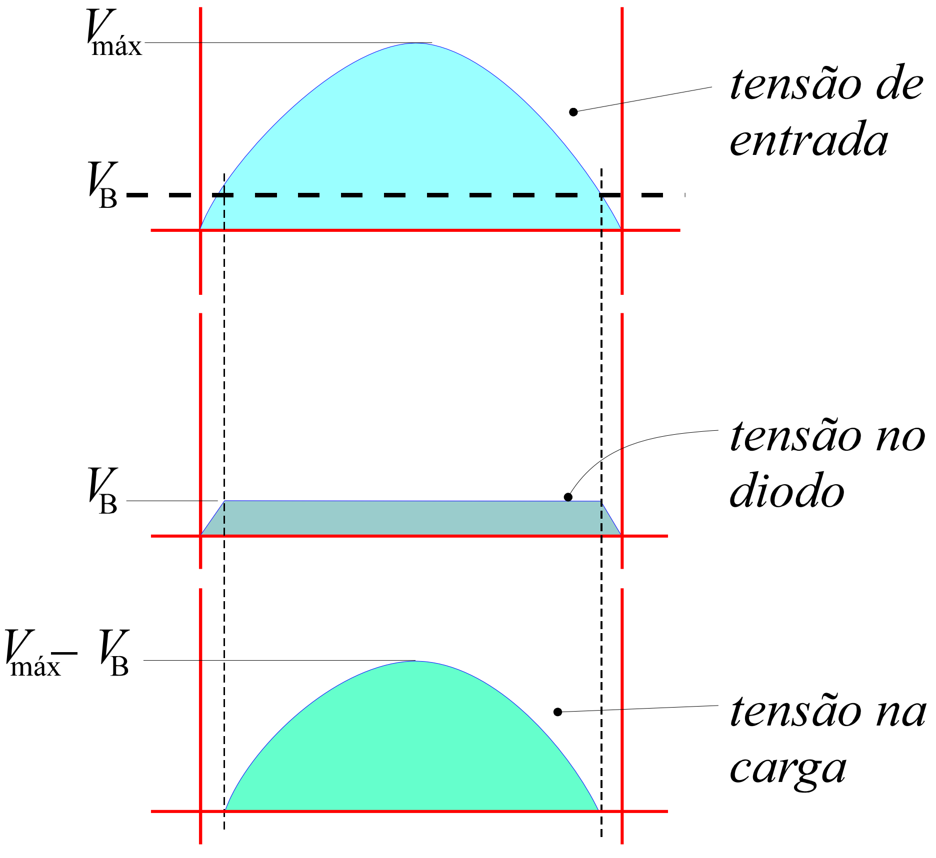


Fig.4 Detalhamento das formas de tensão na entrada do circuito, no diodo e na carga durante o semiciclo positivo.

SEMICICLO NEGATIVO

Durante o semiciclo negativo o potencial no ponto *A* se torna negativo em relação ao ponto *B*. Com essa polaridade na entrada, o diodo entra em bloqueio comportando-se efetivamente como uma chave aberta, impedindo a circulação de corrente, conforme ilustrado na **Fig.5**.

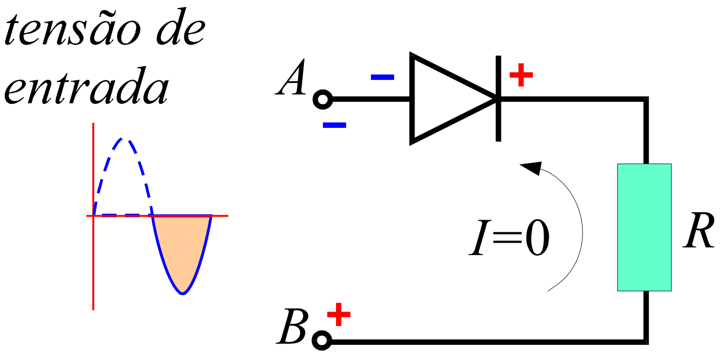


Fig.5 Circuito retificador durante o semiciclo negativo.

A condição de corrente nula no circuito implica que toda a tensão de entrada é transferida para o diodo, com a tensão na carga mantendo-se nula, conforme ilustrado na **Fig.6**.

Conclui-se, portanto, que para cada ciclo completo de tensão de entrada, apenas o semiciclo positivo é transferido diretamente para a carga, estando o semiciclo negativo aplicado diretamente entre os terminais do diodo.

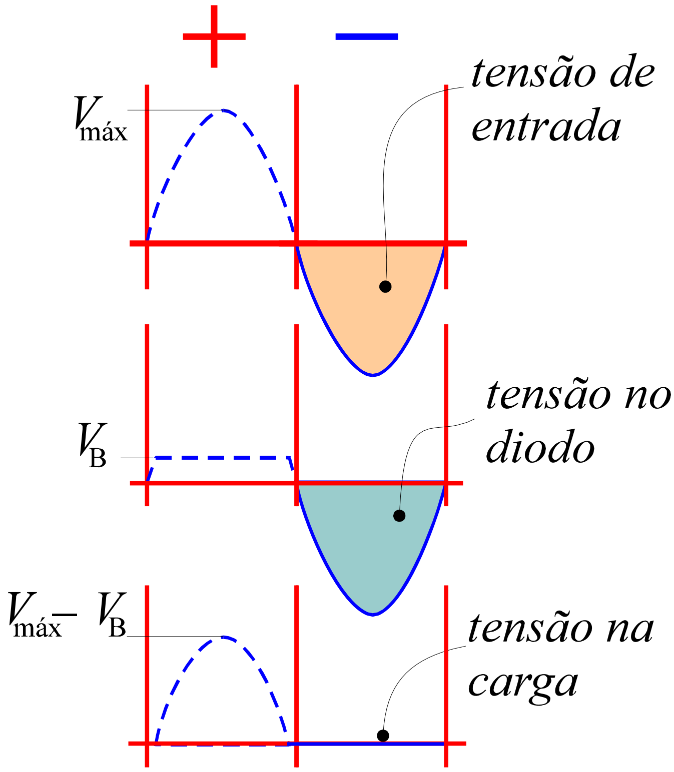


Fig.6 Tensões no circuito retificador durante o semiciclo negativo.

A forma de tensão resultante sobre a carga é denominada de **tensão contínua pulsante**. Esta denominação advém do fato de o fluxo de corrente no circuito se dar em um **único sentido** e na forma de **pulsos** separados por intervalos de tempo nos quais a corrente no circuito é nula.

Se a posição do diodo for invertida, conforme ilustrado na **Fig.7**, a tensão na carga simplesmente muda de sinal conforme ilustrado na **Fig.8**.

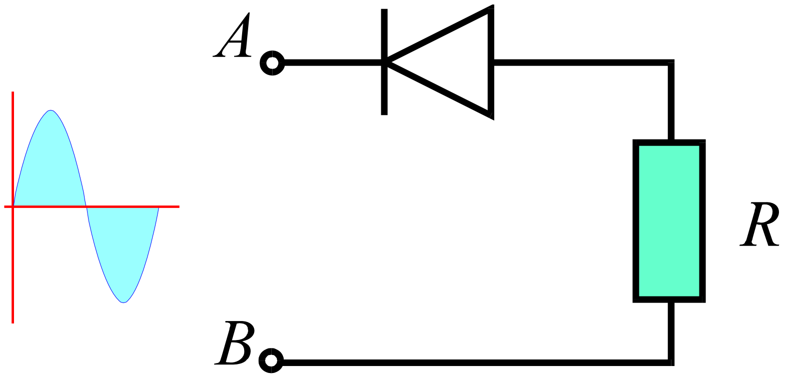


Fig.7 Circuito retificador com diodo invertido em relação à configuração mostrada na **Fig. 2**.

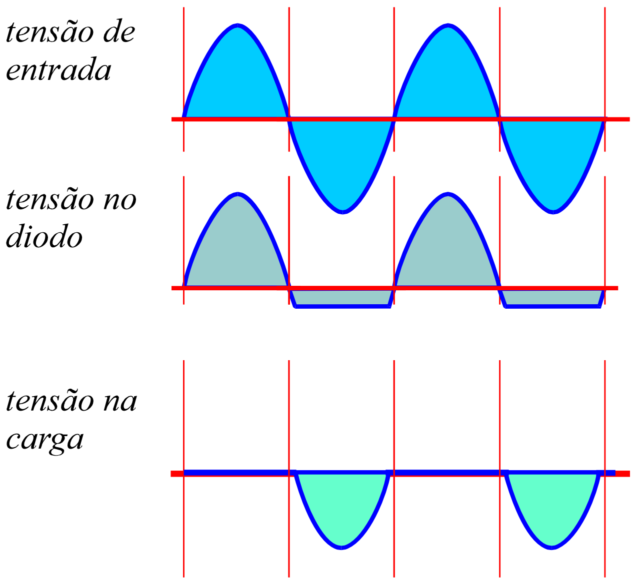


Fig.8 Dependência temporal da tensão na entrada, sobre o diodo e sobre a carga do circuito mostrado na **Fig.7**.

MEDIÇÃO DA TENSÃO NA CARGA

No circuito retificador de meia onda, a tensão de saída que é medida na carga é pulsada. Para medir essa tensão de saída, utiliza-se um multímetro ou um voltímetro de *cc* com as pontas de prova conectadas aos terminais da carga.

O voltímetro cc ou multímetro em escala de tensão cc, conectado à saída do circuito retificador, sempre indica um valor médio para a tensão contínua pulsante sobre a carga.

Na retificação de meia onda alternam-se os períodos de existência e inexistência de tensão sobre a carga. Conseqüentemente, o valor medido de tensão *cc* média sobre a carga é muito inferior ao valor efetivo *ca* que seria medido na entrada do circuito, conforme ilustrado na **Fig.9**.

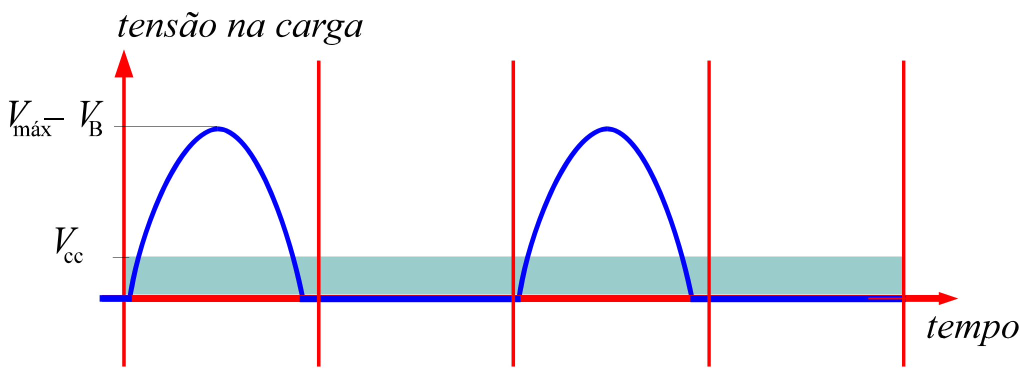


Fig.9 Dependência temporal da tensão na carga e valor médio *cc*.

A tensão média V_{cc} medida na carga , pode ser calculada pela expressão

$$V_{cc} = \frac{V_{máx} - V_B}{\pi} \qquad (1)$$

onde:

V_{cc} = Tensão contínua média sobre a carga.
$V_{máx}$ = Valor máximo da tensão de entrada.
V_B = Queda de tensão no diodo durante o regime de condução, que equivale aproximadamente ao valor do potencial de barreira.

Quando o valor efetivo da tensão de entrada for muito superior ao valor V_B , este pode ser desprezado na **Eq.(1)** para o cálculo de V_{cc} . Com essa aproximação, a **Eq.(1)** assume a forma simplificada

$$V_{cc} = \frac{V_{máx}}{\pi} \qquad (2)$$

ou utilizando a relação entre tensão máxima e tensão efetiva *ca*

$$V_{máx} = \sqrt{2}\, V_{ca} \qquad (3)$$

tem-se que

$$V_{cc} = \frac{\sqrt{2}\, V_{ca}}{\pi} \qquad (4)$$

Com valores típicos de 0,7 e 0,3V para os potenciais de barreira do silício e do germânio, respectivamente, a expressão aproximada dada pela **Eq.(4)** pode ser utilizada na prática quando a condição V_{ca} > 10V, for satisfeita.

A seguir é apresentado um exemplo de cálculo empregando as expressões exata e aproximada.

Exemplo 1: Para o circuito retificador com diodo de silício ilustrado na **Fig.10**, determinar V_{cc} com o uso das **Eqs.(1)** e **(3)** nos seguintes casos: (a) $V_{ca} = 6$ V ; (b) $V_{ca} = 50$ V

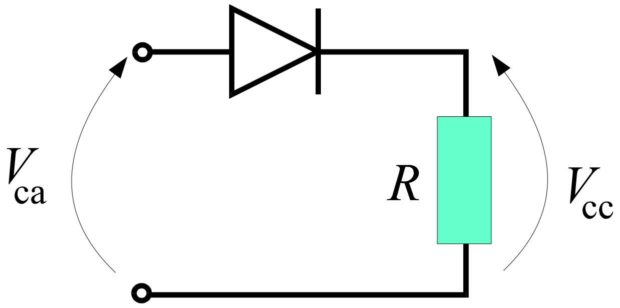


Fig.10 Circuito retificador de meia-onda.

a) Cálculo exato:

Utilizando $V_B = 0{,}7$ V e a **Eq.(1)** com o auxílio da **Eq.(3)**, tem-se que,

$$V_{cc} = \frac{\sqrt{2} \text{ x } 6 - 0{,}7}{\pi} = 2{,}47 \text{ V}$$

Cálculo aproximado:

Utilizando a **Eq.(4)**, tem-se que,

$$V_{cc} = \frac{\sqrt{2} \text{ x } 6}{\pi} = 2{,}70 \text{ V}$$

Nota-se que o erro da aproximação neste caso fica em torno de 10% do valor exato.

b) Com $V_{ca} = 50$ V e $V_B = 0{,}7$ V, e repetindo-se o procedimento adotado no item (a), obtém-se :

Cálculo exato: $V_{cc} = 22{,}30$ V

Cálculo aproximado: $V_{cc} = 22{,}52$ V

No presente caso $V_{ca} >> V_B$ e o erro relativo da aproximação cai para 1% do valor exato.

Como a dependência temporal da corrente na carga é uma réplica daquela correspondente à tensão ilustrada na **Fig.9**, conclui-se que a corrente média no resistor R pode ser determinada simplesmente pela expressão

$$I_{cc} = \frac{V_{cc}}{R} \tag{5}$$

INCONVENIENTES DA RETIFICAÇÃO DE MEIA ONDA

A retificação de meia onda apresenta alguns inconvenientes decorrentes do princípio de funcionamento, conforme sumarizado a seguir.

Variação na tensão de saída

A tensão de saída é pulsante, variando, portanto, de forma significativa e diferindo sensivelmente de uma tensão contínua pura, conforme ilustrado na **Fig.11**.

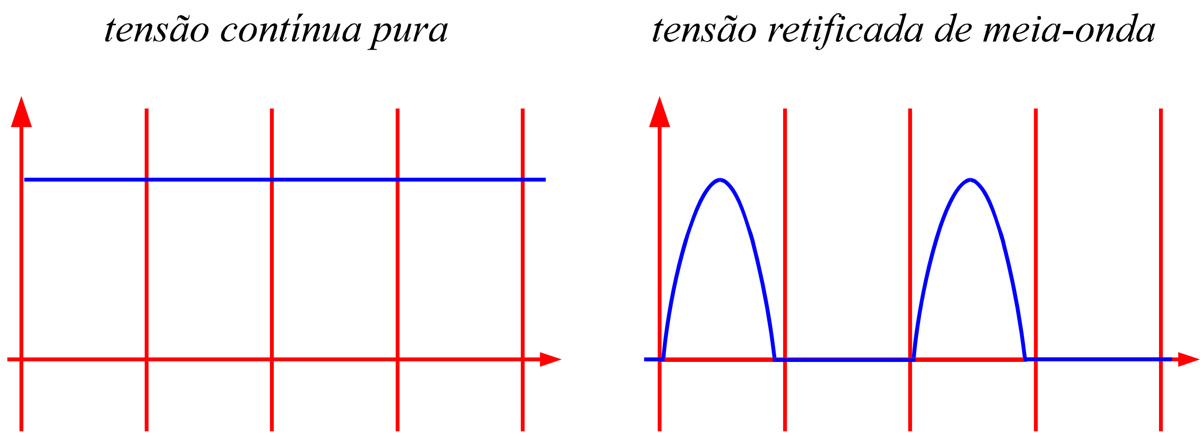


Fig.11 Dependências com o tempo da tensão puramente contínua e da tensão de saída de um circuito retificador de meia onda.

Baixo rendimento

O rendimento, definido pelo percentual da tensão contínua na saída relativo a uma dada tensão *ca* de entrada, é de apenas 45%.

Sub utilização da capacidade do transformador

Nas retificações empregando um transformador na entrada, existe um mau aproveitamento da capacidade de transformação pois a corrente circula em apenas um semiciclo.

FONTE DE ALIMENTAÇÃO DE MEIA ONDA

O circuito retificador de meia onda pode ser utilizado como fonte de alimentação para um circuito eletrônico. Para que se tenha uma fonte de alimentação completa, devem-se acrescentar ao circuito retificador os seguintes componentes:

- Uma chave liga-desliga.
- Um fusível de proteção.
- Uma chave seletora 110/220V.

O diagrama de circuito de uma fonte de alimentação utilizando esses componentes básicos é ilustrado na **Fig.12**, onde se pode observar a possibilidade de operação tanto em 220 quanto em 110 V na entrada.

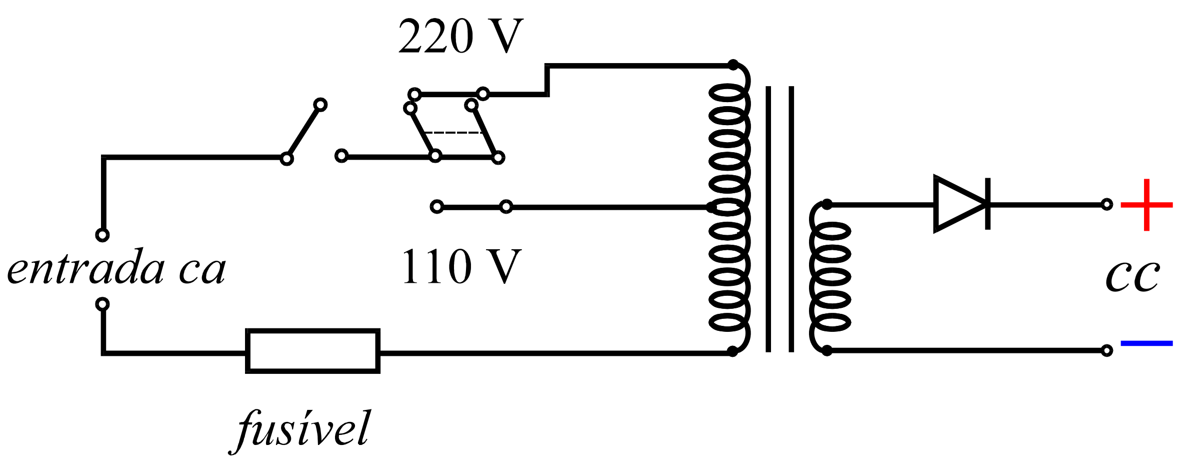


Fig.12 Diagrama de circuito de uma fonte de alimentação empregando retificador de meia onda.

A **Fig.13** mostra como poderia ser feita a interconexão dos componentes básicos utilizados no diagrama da **Fig.12**.

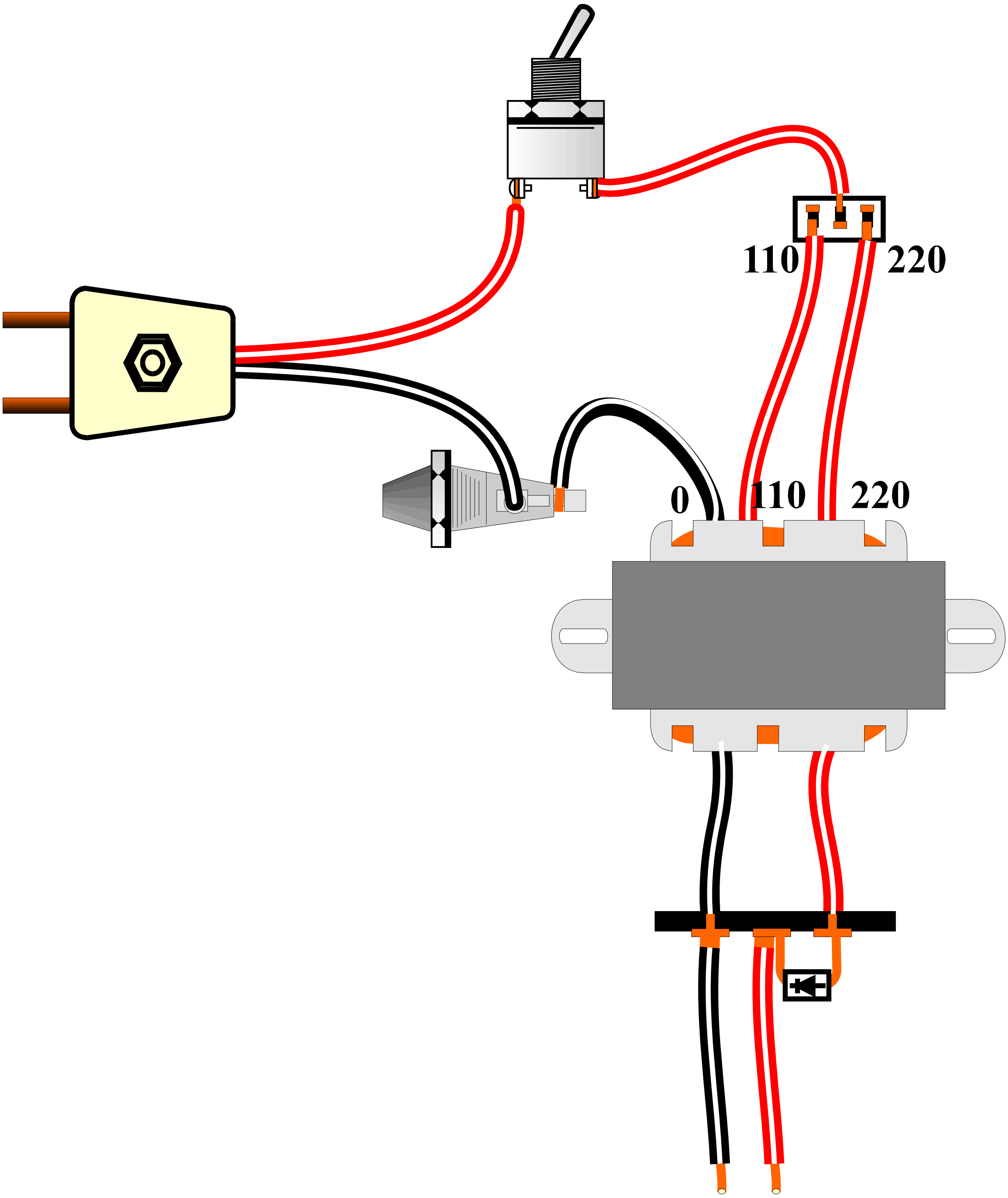


Fig.13 Interconexão dos componentes em uma fonte de alimentação empregando retificação de meia onda.

O circuito mostrado na **Fig.12** pode ser dividido em **quatro partes** ou **etapas** distintas, conforme pode ser visto na **Fig.14**:

ETAPA 1: entrada.
ETAPA 2: controle e proteção.
ETAPA 3: transformação da tensão.
ETAPA 4: retificação.

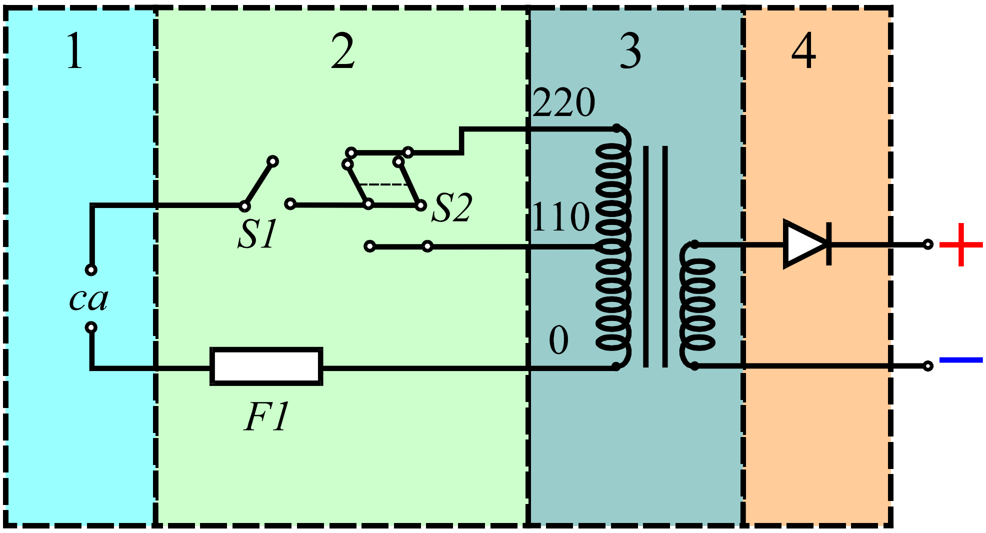


Fig.14 Divisão do diagrama de circuito da **Fig.12** em quatro partes distintas.

Quando uma fonte retificadora de meia onda apresenta defeito, deve-se executar uma seqüência de medidas que permitam localizar a porção ou etapa do circuito com problema para que se possa isolar o componente defeituoso.

Geralmente o defeito é constatado ao se realizar uma medida nos terminais de saída do circuito. Essa medida pode fornecer duas possibilidades de resposta:

a) Existindo tensão *ca* na saída, pode-se imediatamente concluir que as porções ou etapas 1, 2 e 3 não apresentam problemas. O defeito provável é um curto no diodo.

b) Não existindo tensão na saída, existem muitas hipóteses para o defeito. Deve-se, então, realizar o teste por etapas, como listado na **Tabela 1**.

Tabela 1 Seqüência de testes para diagnóstico de defeitos no circuito da **Fig.14**.

Testar se há tensão na saída da ETAPA 3 (secundário do transformador).

Sim: Defeito ocorrido na ETAPA 4 e o diodo está provavelmente em aberto.

Não: Defeito ocorrido em alguma porção entre as ETAPAS 1 e 3

Testar se há tensão na entrada da ETAPA 3 (primário do transformador).

Sim : Defeito ocorrido na ETAPA 3 (transformador). Testar continuidade das bobinas do transformador com um ohmímetro.

Não: Defeito ocorrido nas ETAPAS 1 ou 2.

Testar se há tensão na entrada da ETAPA 1.

Sim: Defeito na ETAPA 2 (controle e proteção). Testar componentes e conexões na ETAPA 2. Caso o fusível esteja rompido, descobrir a causa antes de substituir.

Não: Testar cabo, plugue e verificar se há energia na tomada onde a fonte está sendo conectada.

Observação: Se o defeito for fusível rompido, verificar as causas do rompimento antes de realizar a substituição (diodo em curto, curto entre ligações, saída em curto). O rompimento do fusível também pode ser causado pelo funcionamento anormal do circuito alimentado pela fonte.

O procedimento descrito na **Tabela 1** pode ser organizado na forma de um fluxograma de execução dos testes para diagnóstico do defeito. O fluxograma correspondente está mostrado na **Fig.15**.

A técnica de retificação de meia onda é utilizada quando a carga não necessita ser alimentada por uma *cc* pura. Um exemplo típico de aplicação dessa técnica ocorre no caso dos carregadores de bateria. Nestes dispositivos requer-se

que a corrente de alimentação seja unidirecional, não importando muito a sua forma como função do tempo.

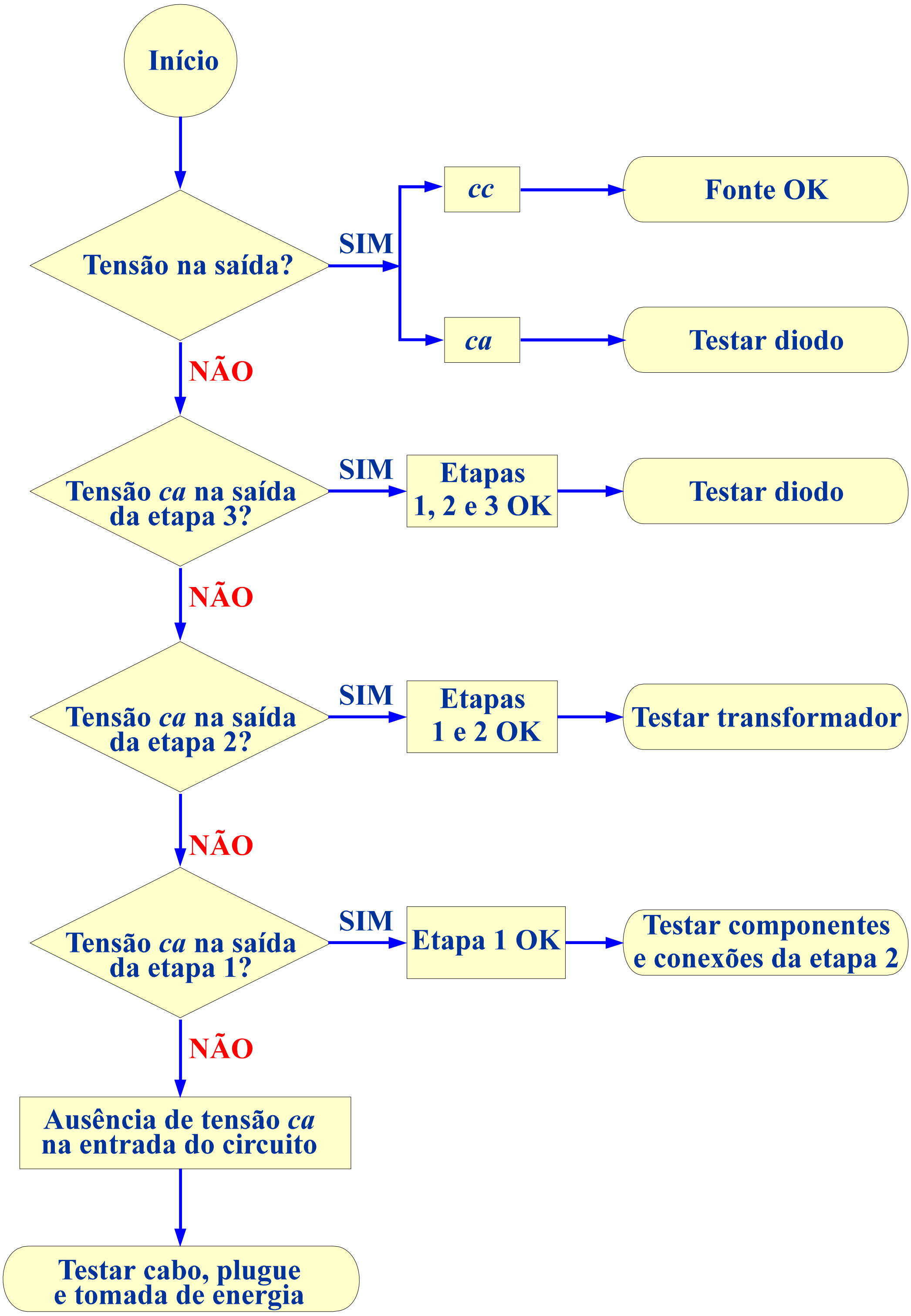


Fig.15 Fluxograma auxiliar para o diagnóstico de defeitos em um circuito retificador de meia onda.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. O que é retificação de meia onda?

2. Desenhe o diagrama de circuito de um retificador de meia onda com diodo semicondutor.

3. Descreva o princípio de funcionamento do retificador de meia onda com diodo semicondutor.

4. Qual o valor da tensão média medida na carga de um retificador a diodo submetido a uma entrada senoidal tendo $V_{máx}$ = 3 V ?

5. Qual a tensão efetiva referente ao resultado obtido na questão 4 ?

6. Se a resistência de carga da questão 4 vale 100 Ω, quais os valores da corrente média e corrente efetiva na carga?

7. Quais são os inconvenientes do processo de retificação de meia onda?

BIBLIOGRAFIA

ARNOLD, Roberts & BRANDT, Hans. Retificadores semicondutores não controlados. São Paulo, E. P. U., 1975, 49p. (Eletrônica Industrial, 1).

CIPELLI, Antônio Marco Vicari & SANDRINI, Waldir João. Teoria e desenvolvimento de projetos de circuitos eletrônicos. 8.ª ed., São Paulo, Érica, 1984, 580p.

SENAI/DN. Reparador de circuitos eletrônicos; Eletrônica Básica II. Rio de Janeiro, Divisão de Ensino e Treinamento , 1979 (Coleção Básica SENAI, Módulo 1).

TRAINING PUBLICATIONS DIVISION OF PERSONEL PROGRAM SUPPORT ACTIVITY. Curso de eletrônica. São Paulo, Hemus, c1975, 178p.

VAN VALKENBURG, NOOGER & NEVILLE. Eletrônica básica. 9.ª ed. Rio de Janeiro, Freitas Bastos, c1975, v.6.

MILLMAN, Jacob e HALKIAS, Christos C., Integrated electronics: analog and digital circuits and systems, São Paulo, McGraw-Hill, 1972.

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Introdução

A retificação de meia onda tem aplicações muito restritas devido à baixa eficiência e a grande variação no tempo da tensão de saída.

Esses efeitos podem ser minimizados pelo uso de um **circuito retificador de onda completa**, que possibilita não só aumentar a eficiência da conversão *ca*/*cc* como também diminuir a ondulação na tensão de saída do circuito. Por essa razão, essa classe de circuitos retificadores é largamente empregada na maioria dos equipamentos eletrônicos operando no regime de *cc*.

Este fascículo tratará dos circuitos retificadores de onda completa onde será descrito o princípio de funcionamento e a metodologia de cálculo de parâmetros e de pesquisa de defeitos, visando a capacitar o leitor a utilizar e reparar essa categoria de dispositivos.

Para a boa compreensão do conteúdo e desenvolvimento das atividades contidas neste fascículo, o leitor deverá estar familiarizado com os conceitos relativos a:

* Transformadores.
* Diodo semicondutor.
* Retificação de meia onda.

Retificação de onda completa

A **retificação de onda completa** é um processo de transformação de *ca* em *cc*, que permite o aproveitamento dos dois semiciclos da tensão de alimentação da carga, conforme ilustrado na **Fig.1**



Fig.1 Diagrama ilustrando o princípio de operação do circuito retificador de onda completa.

O circuito retificador de onda completa é o mais empregado nos equipamentos eletrônicos, pois permite obter um melhor aproveitamento da energia disponível na entrada do circuito.

A retificação de onda completa pode ser realizada com o emprego de um transformador com derivação central e dois diodos semicondutores ou alternativamente, pelo uso de uma ponte de quatro diodos, conforme descrito a seguir.

RETIFICAÇÃO DE ONDA COMPLETA COM DERIVAÇÃO CENTRAL

A retificação de onda completa com derivação central é a denominação técnica que se dá ao circuito retificador de onda completa que emprega dois diodos semicondutores, quando se deriva o terminal negativo de saída do circuito da porção central do secundário do transformador, sendo o terminal positivo considerado no ponto de interconexão dos dois diodos, conforme ilustrado na **Fig.2**.

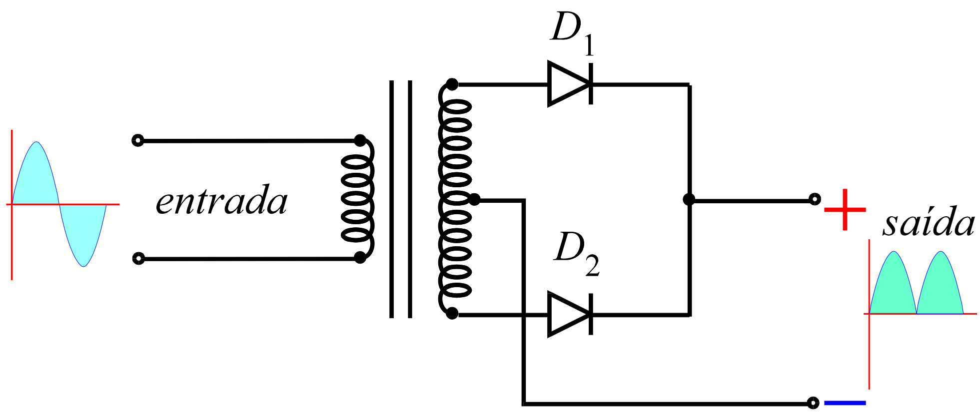


Fig.2 Diagrama de circuito do retificador de onda completa com derivação central.

Esse tipo de configuração também recebe a denominação de *center tap*. A expressão *center tap* é de origem inglesa, sendo traduzida para a língua portuguesa como *derivação central.*

FUNCIONAMENTO

O princípio de funcionamento do circuito retificador de onda completa com derivação central pode ser compreendido analisando-se a operação do circuito por semiciclo da tensão de entrada, conforme exposto a seguir.

Semiciclo negativo

Estabelecendo-se a referência de potencial no primário e secundário do transformador, conforme indicado na **Fig.3**, verifica-se, que durante o semiciclo negativo da tensão de entrada, o ânodo do diodo D_1 fica submetido a um potencial positivo, ao passo que o ânodo do diodo D_2 fica submetido a um potencial negativo.

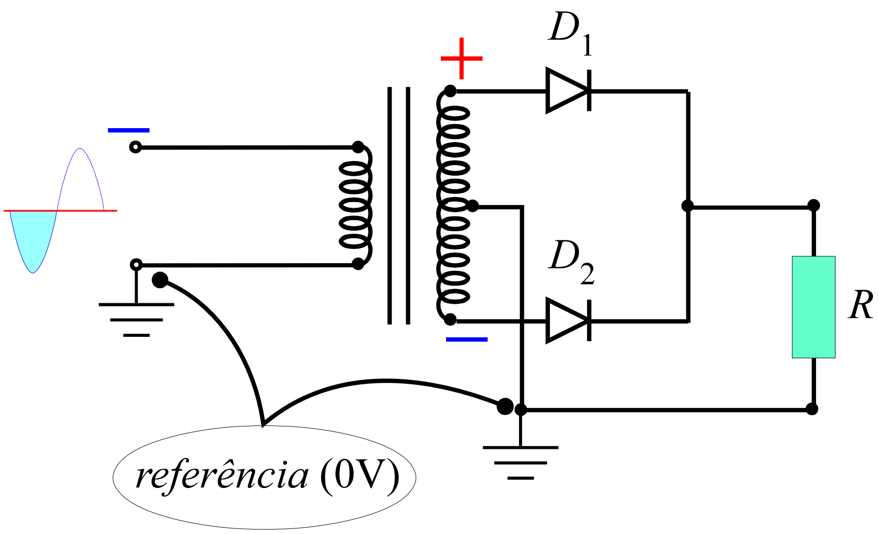


Fig.3 Retificador de onda completa submetido a uma tensão de entrada negativa.

Dessa forma, o diodo D_1 entra no estado de condução enquanto o diodo D_2 entra em bloqueio. Utilizando-se o modelo ideal para o diodo semicondutor, obtém-se o circuito equivalente ilustrado na **Fig.4**. Como pode ser aí observado, a condição de condução de D_1 permite a circulação de corrente através da carga do terminal positivo para o terminal de referência. Nessas condições, a tensão existente no primário é transferida, com uma inversão de sinal, diretamente para a carga.

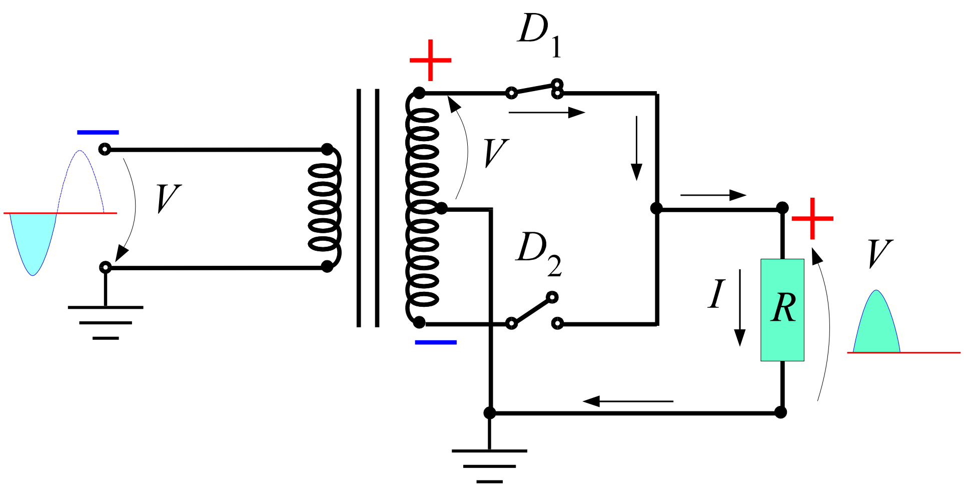


Fig.4 Circuito equivalente para o retificador de onda completa durante o semiciclo negativo.

Semiciclo positivo

Durante o semiciclo positivo, ocorre a inversão de polaridade no secundário do transformador, conforme ilustrado na **Fig.5**. Conseqüentemente, o diodo D_1 torna-se inversamente polarizado entrando em bloqueio. O estado de polarização direta nesse caso ocorre no diodo D_2, que entra no regime de condução.

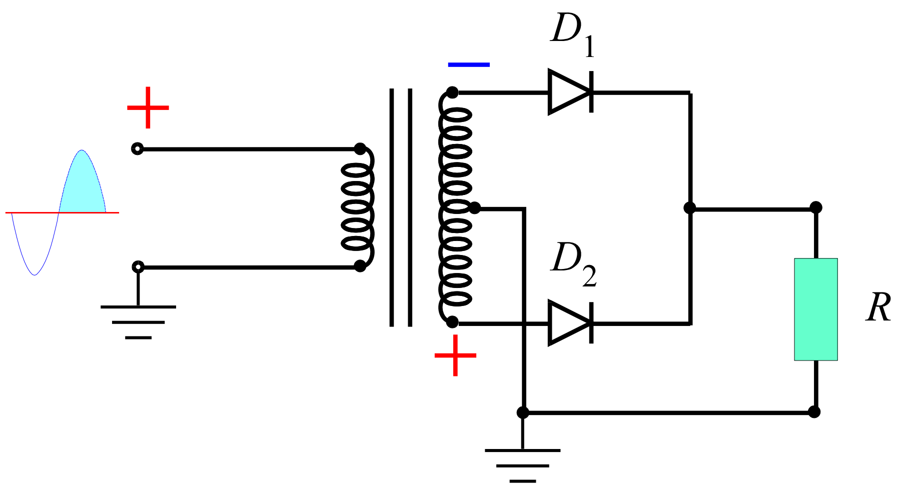


Fig.5 Circuito retificador de onda completa submetido a uma tensão positiva.

O circuito equivalente durante este semiciclo é, portanto, oposto àquele correspondente ao semiciclo negativo, conforme ilustrado na **Fig.6**. A corrente agora circula pela carga, através do diodo D_2 que está em condução. O fluxo de corrente mantém-se no mesmo sentido daquele obtido durante o semiciclo negativo, e a tensão no primário é transferida diretamente para a carga, conforme ilustrado na **Fig.6**.

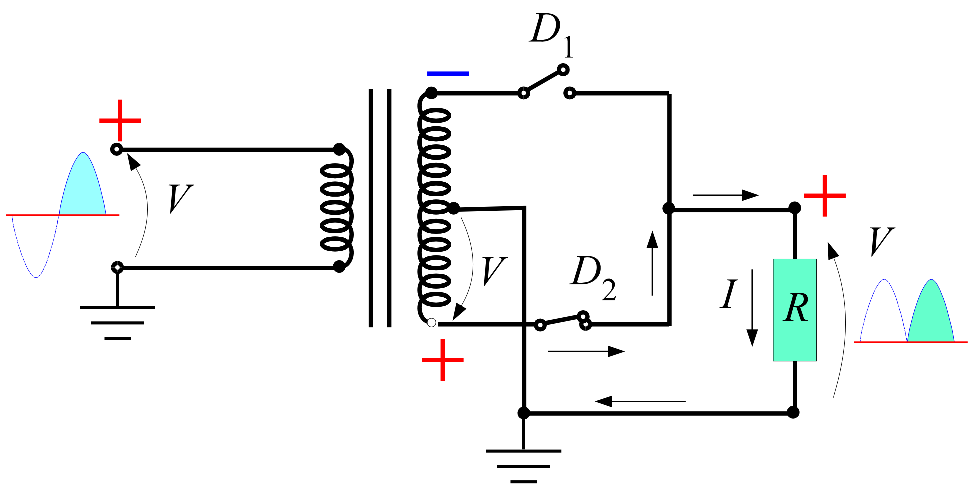


Fig.6 Circuito equivalente para o retificador de onda completa durante o semiciclo positivo.

Analisando-se, portanto, um ciclo completo da tensão de entrada, verifica-se que o circuito retificador transfere para a carga dois semiciclos de tensão positiva com relação à referência de potencial, conforme ilustrado na **Fig.7**, onde os diodos conduzem isoladamente em cada semiciclo.

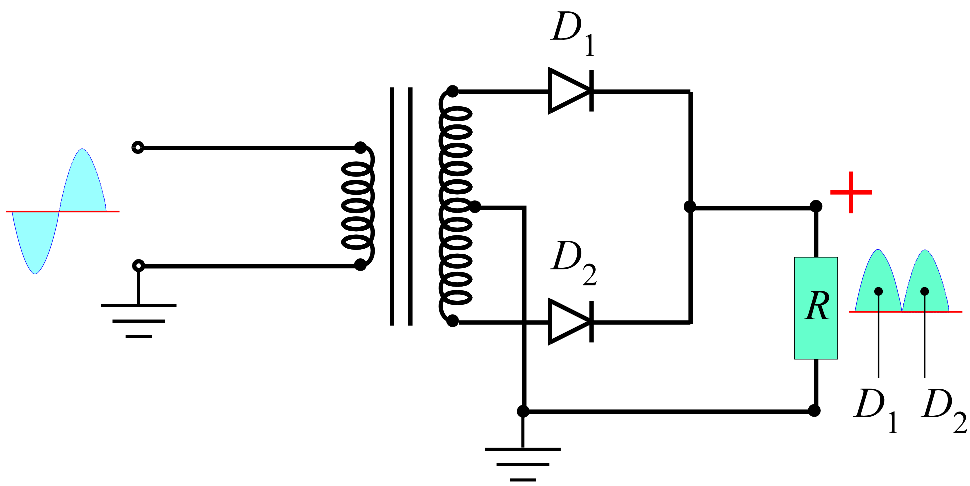


Fig.7 Resposta do retificador durante um ciclo completo na entrada.

TENSÃO E CORRENTE DE SAÍDA

Tensão de saída

A retificação de onda completa com derivação central transfere à carga dois semiciclos positivos de tensão para cada ciclo da tensão de entrada. Como a tensão de saída é formada de pulsos idênticos de tensão, o que é mostrado na **Fig.8**, a tensão *cc* que seria medida na carga pode ser obtida determinando-se o valor médio da tensão de saída em apenas um semiciclo da tensão de entrada.

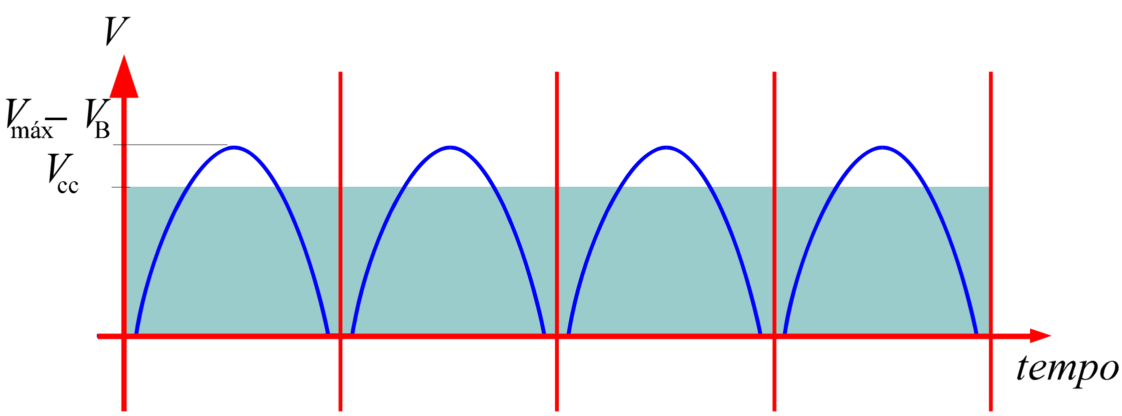


Fig.8 Dependência temporal da tensão na saída do retificador.

Uma vez que a média pode ser calculada em um único semiciclo, o valor a ser obtido deve corresponder ao dobro daquele determinado no caso do retificador de meia onda. Dessa forma, e com base nos resultados obtidos para o retificador de meia onda, a tensão V_{cc} medida na carga é dada por

$$V_{cc} = 2\left(\frac{V_{máx} - V_B}{\pi}\right) \qquad (1)$$

Inserindo a relação $V_{máx} = \sqrt{2}\,V_{ca}$ na **Eq.(1)**, resulta

$$V_{cc} = 2\left(\frac{\sqrt{2}\,V_{ca} - V_B}{\pi}\right) \qquad (2)$$

A tensão V_{ca} é aquela medida no secundário do transformador com respeito ao ponto de derivação central, conforme indicado na **Fig.9**, e corresponde ao valor medido na entrada. Pode-se, portanto, concluir que:

O rendimento da retificação de onda completa com derivação central é o dobro daquele obtido na retificação de meia onda.

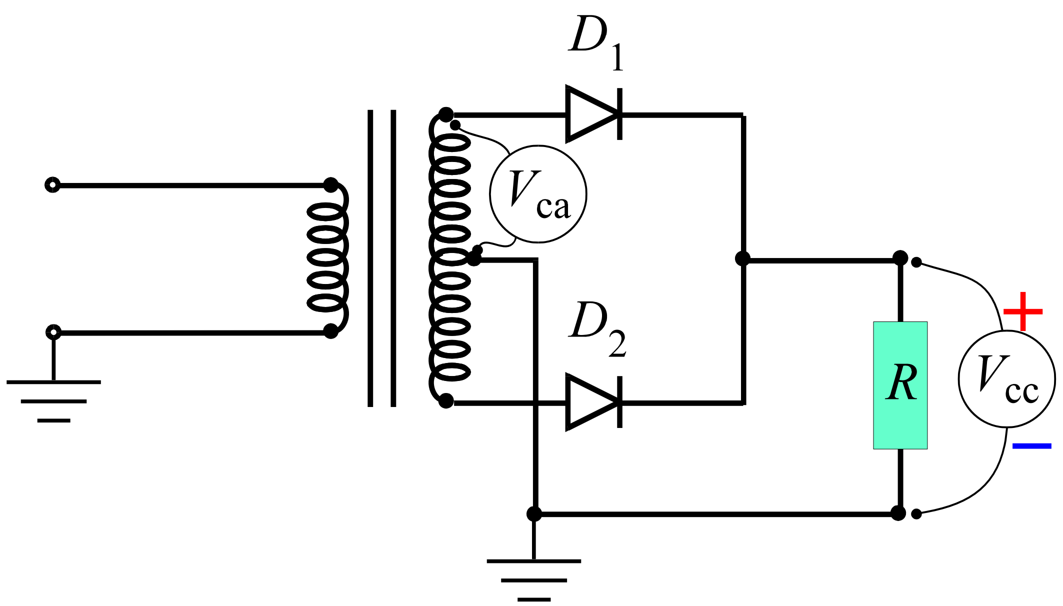


Fig.9 Parâmetros de medição no retificador de onda completa do tipo *center tap*.

Observando atentamente o processo de retificação de onda completa com derivação central, verifica-se que cada metade do circuito corresponde a um retificador de meia onda que opera isoladamente em cada semiciclo da tensão de entrada, conforme ilustrado na seqüência de diagramas da **Fig.10**.

Como neste tipo de retificação um ciclo completo da tensão *ca* de entrada é transformado em dois semiciclos de tensão sobre a carga, conclui-se que a freqüência dos picos de tensão na carga é o dobro da freqüência da rede.

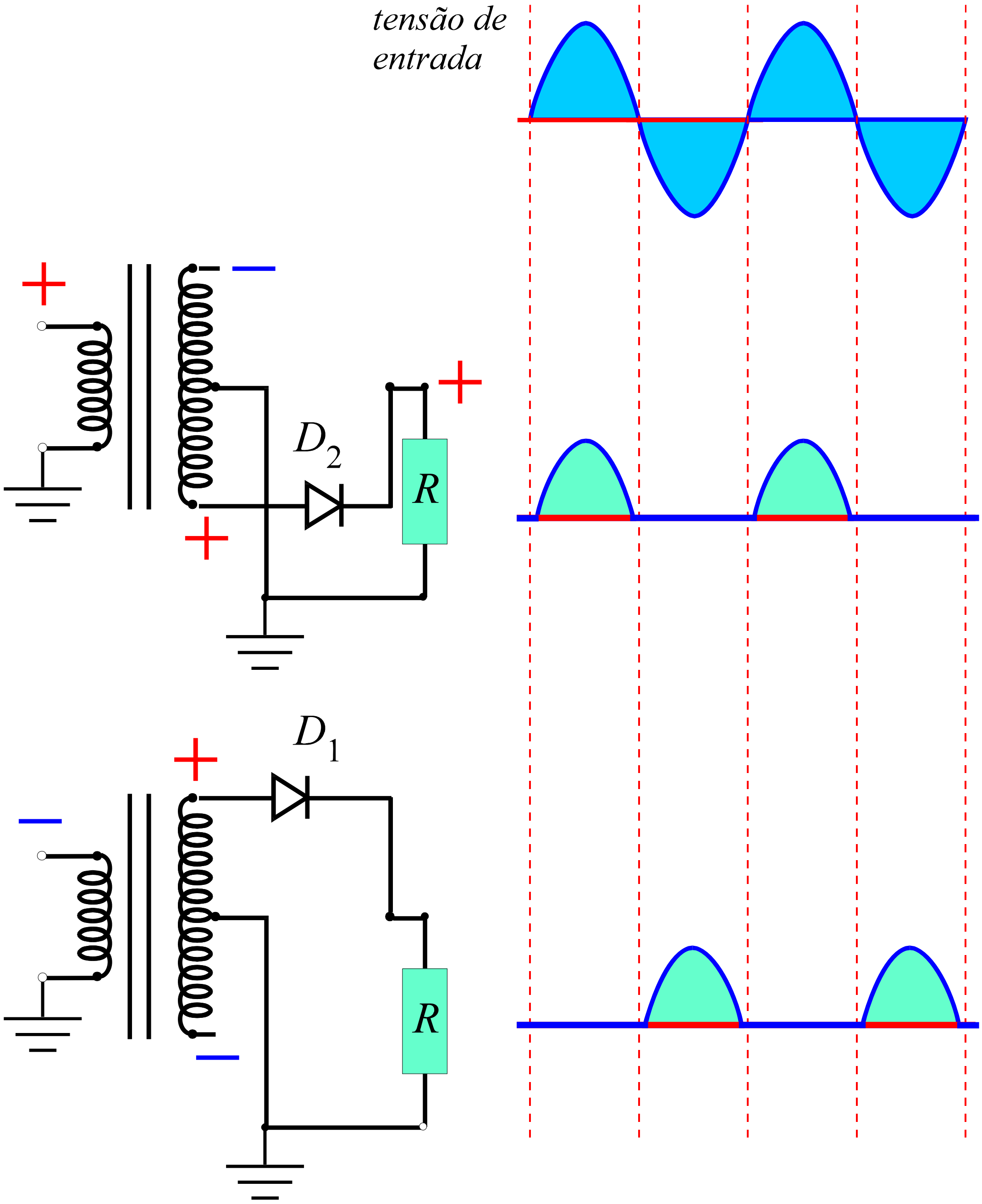


Fig.10 Retificador de onda completa visto como dois retificadores de meia onda que se alternam a cada semiciclo da tensão de entrada.

Quando o valor efetivo da tensão de entrada for muito superior ao valor V_B, este pode ser desprezado na **Eq.(1)** para o cálculo de V_{cc}. Nessa aproximação, a **Eq.(1)** assume a forma simplificada

$$V_{cc} = \frac{2V_{máx}}{\pi} \qquad (3)$$

Inserindo a relação $V_{máx} = \sqrt{2}\,V_{ca}$, na **Eq.(3)**, obtém-se

$$V_{cc} = \frac{2\sqrt{2}\,V_{ca}}{\pi} = 0{,}9\,V_{ca} \qquad (4)$$

Com valores típicos de 0,7 e 0,3V para o potencial de barreira do silício e do germânio, respectivamente, a expressão aproximada dada pela **Eq.(4)** pode ser utilizada na prática quando a condição $V_{ca} \geq 10V$ for satisfeita.

No retificador de onda completa, a tensão cc na carga pode atingir 90% do valor ca medido entre um dos terminais extremos do secundário e o ponto de derivação central.

Corrente de saída

Como as variações da corrente na carga seguem as mesmas variações da tensão aí presente em cada instante de tempo, conclui-se que a corrente média no resistor R pode ser determinada simplesmente pela expressão

$$I_{cc} = \frac{V_{cc}}{R} \qquad (5)$$

A seguir são apresentados dois exemplos do cálculo da tensão e da corrente *cc* no retificador de onda completa com derivação central.

Exemplo 1: Para o circuito retificador com diodo de silício ilustrado na **Fig.11**, determinar V_{cc} e I_{cc} para V_{ca} = 6 V.

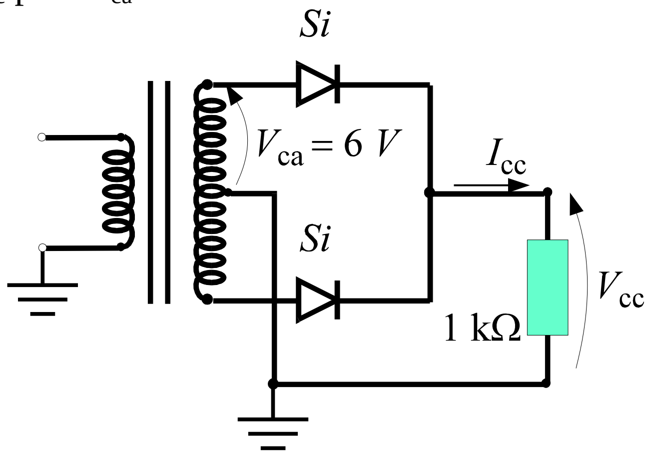


Fig.11 Circuito retificador para o **Exemplo 1**.

Com $V_{ca} < 10$ V, utiliza-se a **Eq.(2)**, ou seja,

$$V_{cc} = 2 \times \left(\frac{\sqrt{2} \times 6 - 0{,}7}{\pi} \right) = 2 \times \left(\frac{1{,}41 \times 6 - 0{,}7}{3{,}14} \right) = 2 \times \left(\frac{8{,}46 - 0{,}7}{3{,}14} \right)$$

$$\Rightarrow\ V_{cc} = 2 \times \left(\frac{7{,}76}{3{,}14} \right) = 2 \times 2{,}47 = 4{,}94\ \text{V}$$

A corrente na carga é obtida com o uso da **Eq.(5)**, fornecendo

$$I_{cc} = \frac{4{,}94\text{V}}{1.000\,\Omega} = 4{,}94\ \text{mA}$$

Exemplo 2: Para o circuito retificador com o diodo de silício ilustrado na **Fig.12**, determinar V_{cc} e I_{cc} para V_{ca} = 20 V.

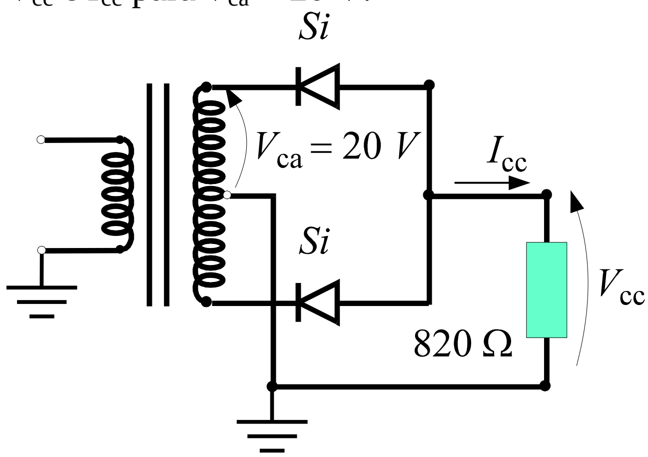


Fig.12 Circuito retificador para o **Exemplo 2**.

Com V_{ca} > 10 V, utiliza-se a **Eq.(4)**. Note-se, no entanto, que na **Fig.12** a posição dos diodos está invertida com respeito à configuração da **Fig.11**. Uma troca de sinal é, portanto, necessária no primeiro membro da **Eq.(4)**, fornecendo

$$-V_{cc} = 0{,}9\,V_{ca} = 0{,}9 \times 20 = 18\text{V}$$

$$\Rightarrow V_{cc} = -18\text{V}$$

Utilizando a **Eq.(5),** a corrente na carga é

$$I_{cc} = \frac{-18\text{V}}{820\,\Omega} = -21{,}9\text{ mA}$$

RETIFICAÇÃO DE ONDA COMPLETA EM PONTE

A retificação de onda completa em ponte utiliza quatro diodos semicondutores e transfere para a carga uma onda retificada, sem a necessidade de uso de um transformador com derivação central, conforme ilustrado na **Fig.13**.

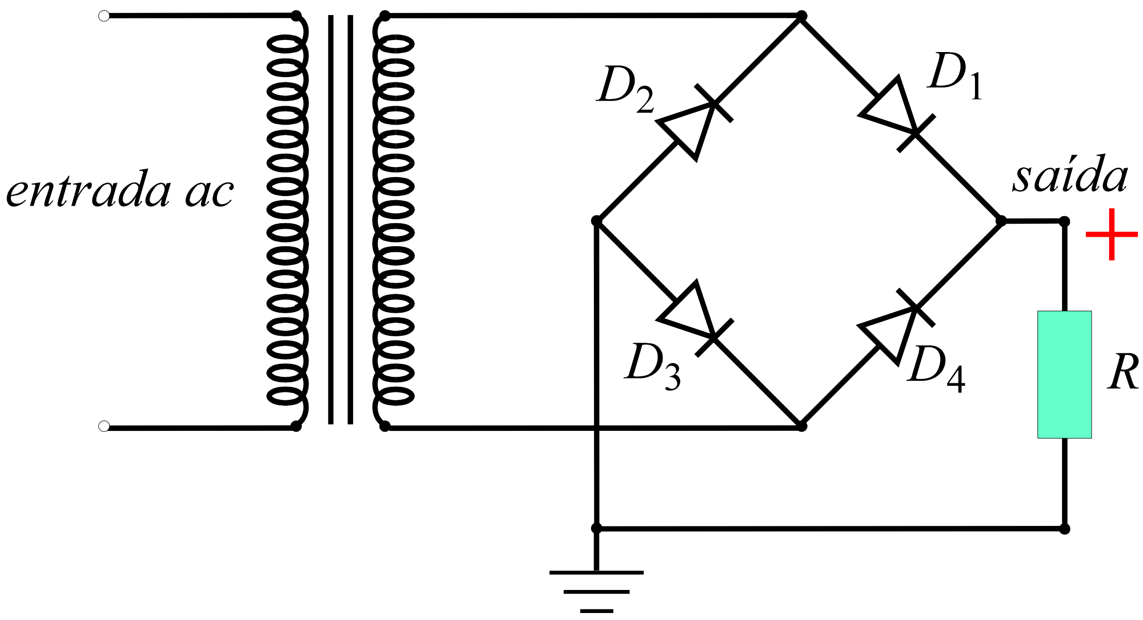


Fig.13 Retificador de onda completa com ponte de quatro diodos.

Esse tipo de configuração, também denominado de *Ponte de Graëtz*, tem o seu princípio de funcionamento descrito a seguir.

FUNCIONAMENTO

Semiciclo positivo

Considerando o semiciclo de tensão positiva na entrada do circuito ilustrado na **Fig.14**, uma inspeção das polarizações dos quatro diodos indica os regimes de operação listados na **Tabela 1**.

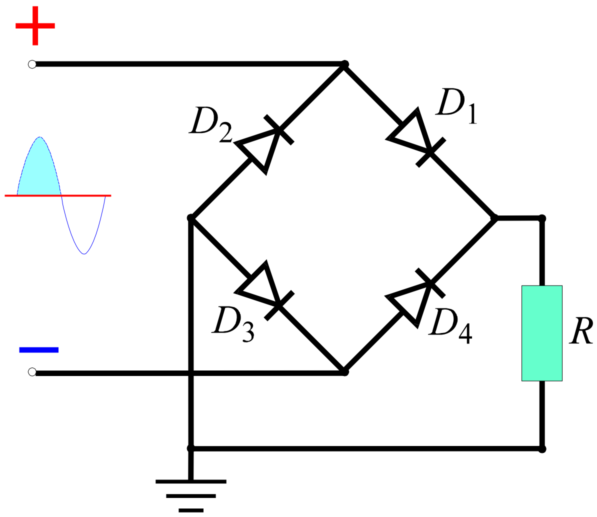


Fig.14 Retificador em ponte durante o semiciclo positivo.

Tabela 1 Polarizações e regimes de operação dos diodos durante o semiciclo positivo da tensão de entrada.

Diodo	Polarização	Regime de operação
D_1	ânodo positivo em relação ao cátodo	condução
D_2	cátodo positivo em relação ao ânodo	bloqueio
D_3	cátodo negativo em relação ao ânodo	condução
D_4	ânodo negativo em relação ao cátodo	bloqueio

Utilizando o modelo da chave ideal para o diodo, e as condições estabelecidas na **Tabela 1**, obtém-se o circuito equivalente apresentado na **Fig.15**.

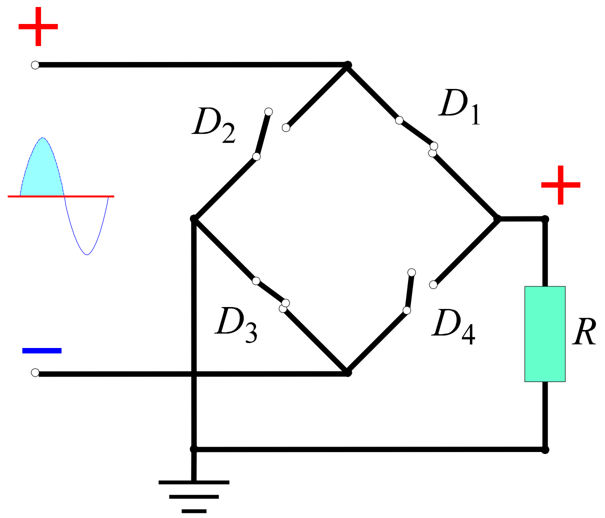


Fig.15 Circuito equivalente do retificador em ponte durante o semiciclo positivo.

Como as chaves em aberto não interferem no funcionamento do circuito, verifica-se que D_1 e D_3 em condução fecham o circuito elétrico, tornando os pontos A e B da **Fig.16** equivalentes. Dessa forma, a tensão de entrada é transferida para a carga**.**

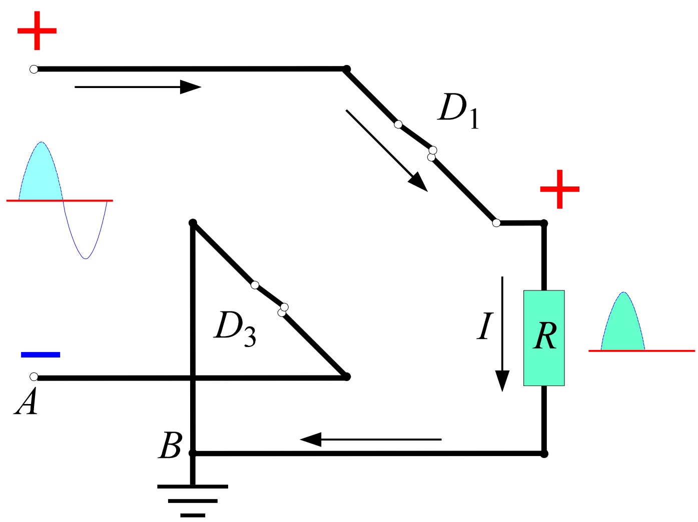


Fig.16 Simplificação do circuito da **Fig.15**.

Semiciclo negativo

Durante o semiciclo negativo, ocorre a inversão de polaridade nos terminais de entrada do circuito, conforme mostrado na **Fig.17** e os regimes de operação dos diodos são modificados conforme listado na **Tabela 2**.

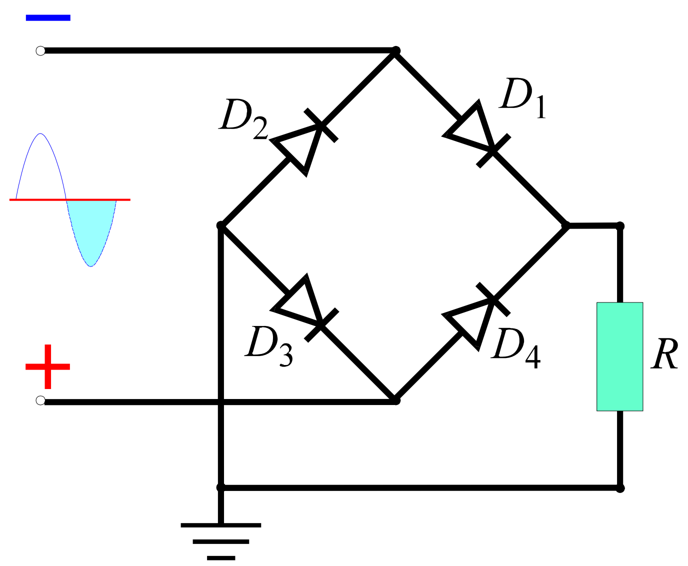


Fig.17 Retificador em ponte durante o semiciclo negativo.

Tabela 2 Polarizações e regimes de operação dos diodos durante o semiciclo negativo da tensão de entrada.

Diodo	Polarização	Regime de operação
D_1	ânodo negativo em relação ao cátodo	bloqueio
D_2	cátodo negativo em relação ao ânodo	condução
D_3	cátodo positivo em relação ao ânodo	bloqueio
D_4	ânodo positivo em relação ao cátodo	condução

Com base na **Tabela 2,** e utilizando-se novamente o modelo da chave ideal para o diodo, obtém-se o circuito equivalente mostrado na **Fig.18**.

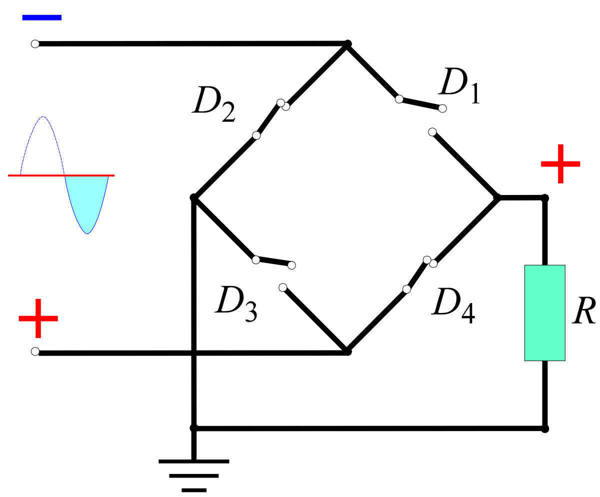


Fig.18 Circuito equivalente para a ponte retificadora durante o semiciclo negativo.

O circuito equivalente com as chaves em aberto removidas é mostrado na **Fig.19**. Um exame do circuito indica que a tensão de entrada é transferida, com uma inversão de sinal, para a carga. Como a tensão de entrada é negativa, aquela na carga permanece positiva, completando, assim, o processo de retificação.

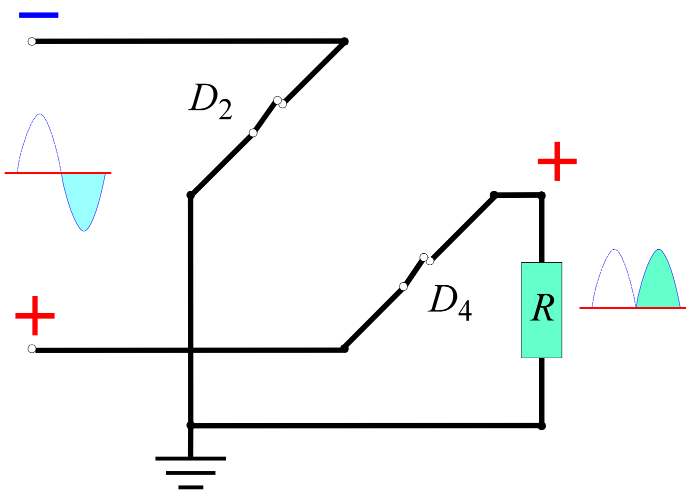


Fig.19 Circuito equivalente resultante do retificador em ponte durante o semiciclo negativo.

A **Fig.20** ilustra como a corrente flui no circuito durante o semiciclo negativo da tensão de entrada, onde se pode verificar que o fluxo de corrente se dá no mesmo sentido daquele obtido durante o semiciclo positivo.

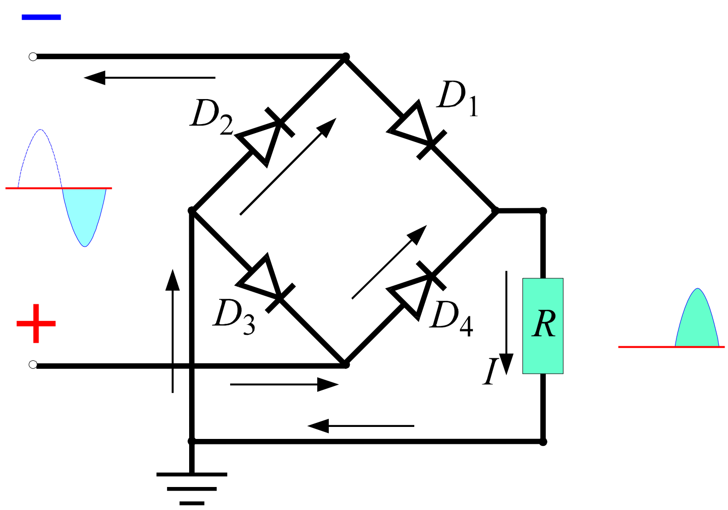


Fig.20 Fluxo de corrente na ponte retificadora durante o semiciclo negativo da tensão de entrada.

A ponte retificadora é muitas vezes representada nos esquemas elétricos pelo diagrama mostrado na **Fig.21**, com a barra e a seta do símbolo do diodo indicando os terminais positivo e negativo, respectivamente. Os outros dois terminais representam os pontos de conexão da tensão de entrada.

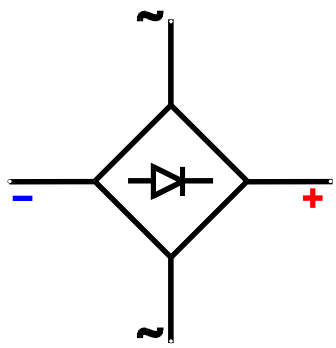


Fig.21 Representação da ponte retificadora.

TENSÃO E CORRENTE DE SAÍDA

Tensão de saída

A ponte de Graëtz fornece na saída o mesmo tipo de forma de onda que aquela obtida no processo de retificação com derivação central. Na retificação em ponte, no entanto, há uma alteração no valor de pico da tensão na carga, devido à existência de dois diodos em regime de condução durante cada semiciclo da tensão de entrada. Conseqüentemente, a tensão de pico na carga é diminuída de uma quantidade correspondente ao dobro da queda de tensão V_B através de cada diodo, conforme ilustrado na **Fig.22**.

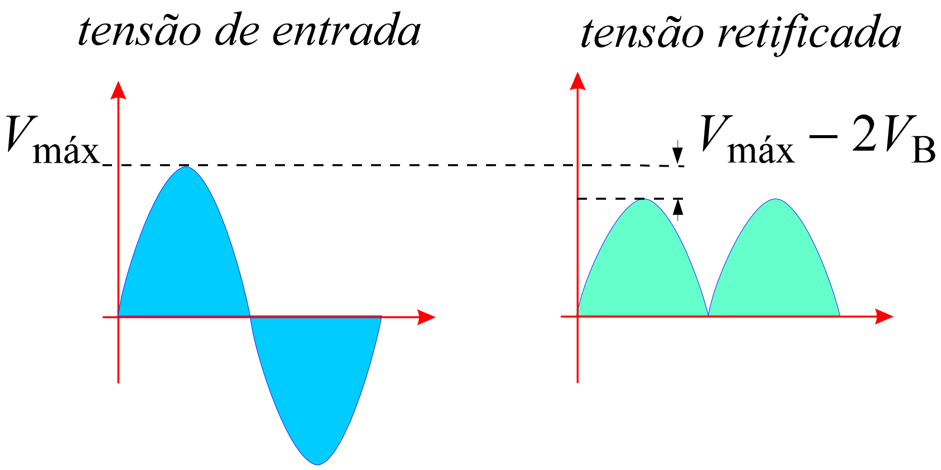


Fig.22 Parâmetros definindo as tensões de entrada e saída no retificador em ponte.

A partir dessas considerações, pode-se concluir que a tensão *cc* medida na carga é dada pela expressão

$$V_{cc} = 2 \times \left(\frac{V_{\text{máx}} - 2V_B}{\pi} \right) \qquad (6)$$

ou alternativamente

$$V_{cc} = 2 \times \left(\frac{\sqrt{2}\,V_{ca} - 2V_B}{\pi} \right) \qquad (7)$$

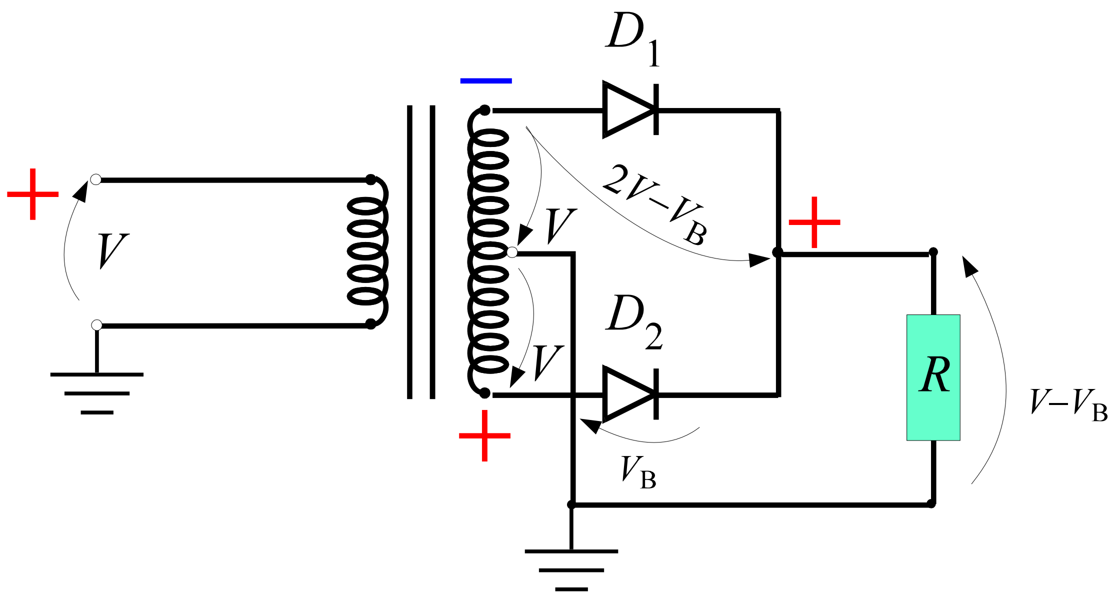
Na prática, para o caso de diodos de silício, a queda de tensão $2V_B$ na **Eq.(7)** poderá ser desprezada se a tensão de entrada satisfizer a condição $V_{ca} > 20$ V. Nessa aproximação, a tensão V_{cc} poderá ser obtida por intermédio da **Eq.(4)**.

Uma característica presente na configuração em ponte é a existência de uma tensão inversa V_{ca} sobre cada diodo operando em bloqueio, como mostrado na **Fig.23a**. Por outro lado, como se pode observar na **Fig.23b**, a tensão inversa aplicada sobre o diodo em bloqueio na configuração *center tap* é praticamente duas vezes superior.

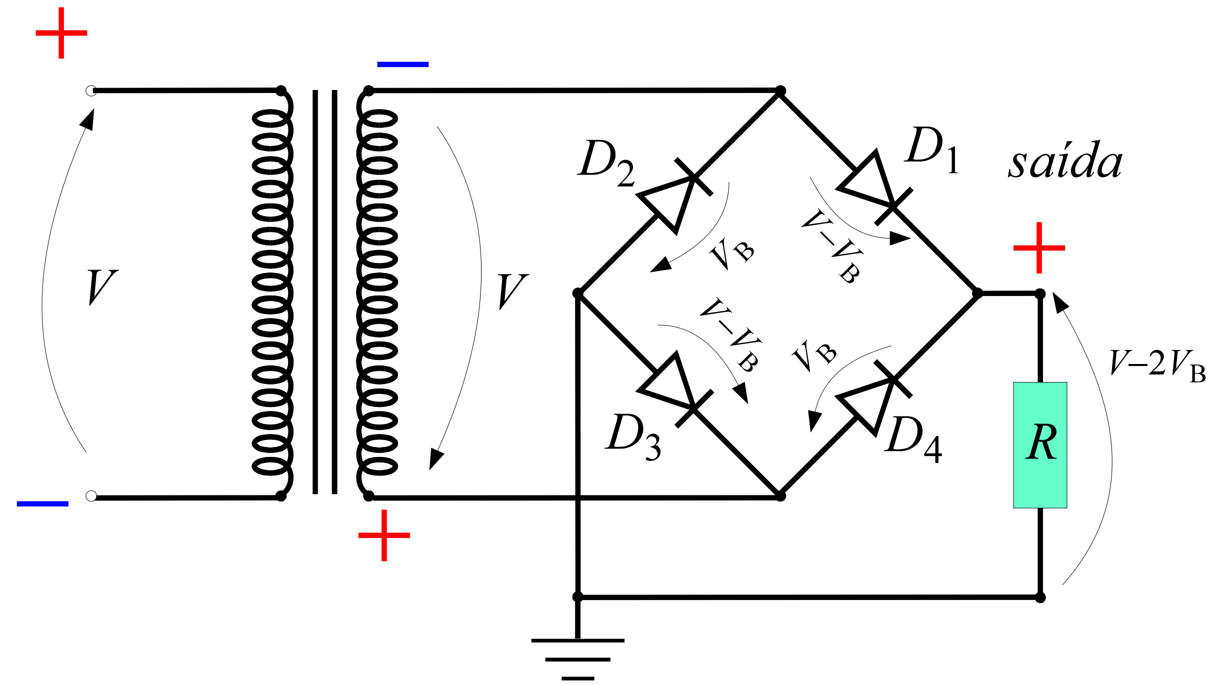
Essa diferença representa uma vantagem do retificador em ponte em comparação com o retificador do tipo *center tap*, pelas seguintes razões:

- Uma menor voltagem inversa em cada diodo permite que o retificador em ponte possa operar a níveis mais elevados de potência do que o retificador *center tap*.

- A tensão no secundário do transformador é utilizada quase que integralmente para alimentação da carga em cada semiciclo. Para o retificador com derivação central, metade do secundário do transformador fica energizada apenas para manter um dos diodos em bloqueio; o que implica em uma menor eficiência.



a) D_1 em bloqueio, D_2 em condução.



b) D_1 e D_3 em bloqueio, D_2 e D_4 em condução.

Fig.23 Tensões nos diodos dos retificadores: **(a)** *center tap*, **(b)** ponte de quatro diodos.

Corrente de saída

Como no caso do retificador de onda completa com derivação central, a corrente média na carga do retificador em ponte é dada pela **Eq.(5)**.

Exemplo 3: Para o circuito mostrado na **Fig.24**, que consiste de uma ponte retificadora com diodos de germânio, determine a tensão e corrente *cc* na carga.

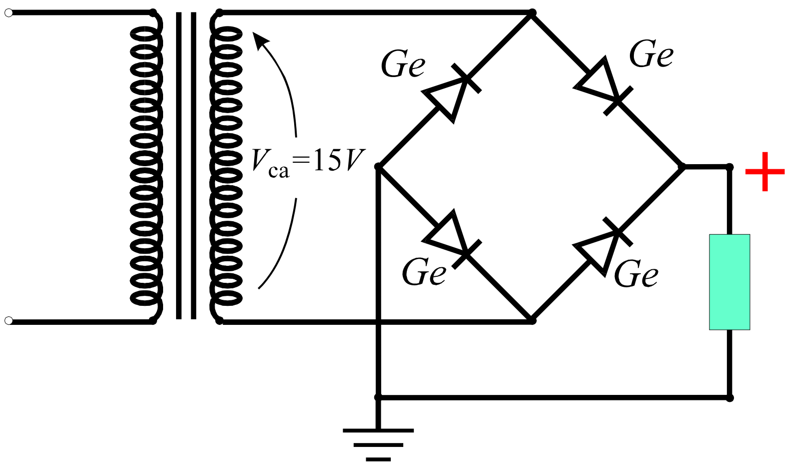


Fig.24 Circuito retificador para o **Exemplo 3**.

Utilizando a **Eq.(7)** com V_B = 0,3 V, obtém-se

$$V_{cc} = 2 \times \left(\frac{1{,}41 \times 15 - 2 \times 0{,}3}{3{,}14} \right) = \frac{2 \times 20{,}55}{3{,}14} = \frac{41{,}10}{3{,}14} = 13{,}10\ \text{V}$$

A corrente *cc* na carga é obtida da **Eq.(5)** com R = 2,2 kΩ, resultando em

$$V_{cc} = \frac{13{,}10}{2.200\Omega} = 5{,}95\ \text{mA}\,.$$

FONTE DE ALIMENTAÇÃO DE ONDA COMPLETA

O circuito retificador de onda completa é utilizado como fonte de alimentação para circuitos de freio eletromagnético, alimentação de eletroimãs, brinquedos eletrônicos etc. Nas **Figs. 25** e **26** são ilustrados os circuitos de alimentação de onda completa divididos em 4 **partes** ou **etapas** discriminadas a seguir:

ETAPA 1: entrada
ETAPA 2: controle e proteção
ETAPA 3: transformação da tensão
ETAPA 4: retificação

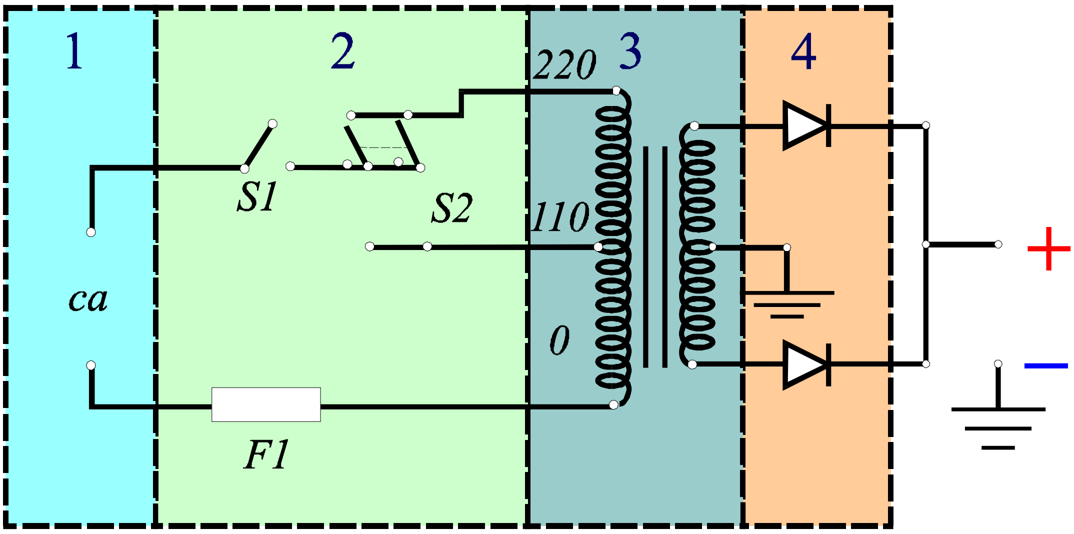


Fig.25 Divisão do circuito retificador *center tap* para o diagnóstico de defeitos.

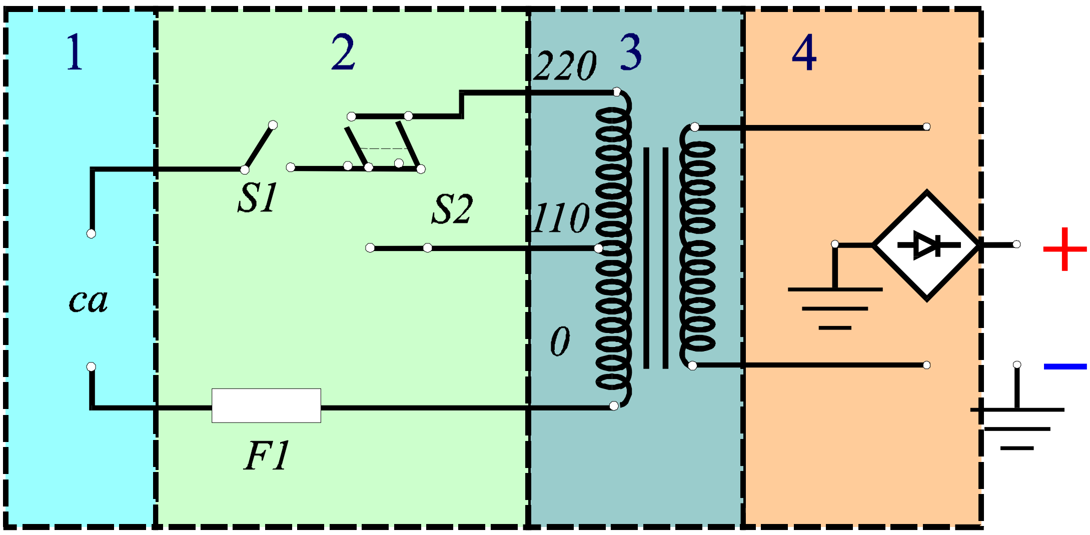


Fig.26 Divisão do circuito retificador em ponte para o diagnóstico de defeitos.

Para testar as condições de operação e realizar a inspeção de defeitos no circuito, o procedimento descrito no fluxograma da **Fig.27** é geralmente efetuado.

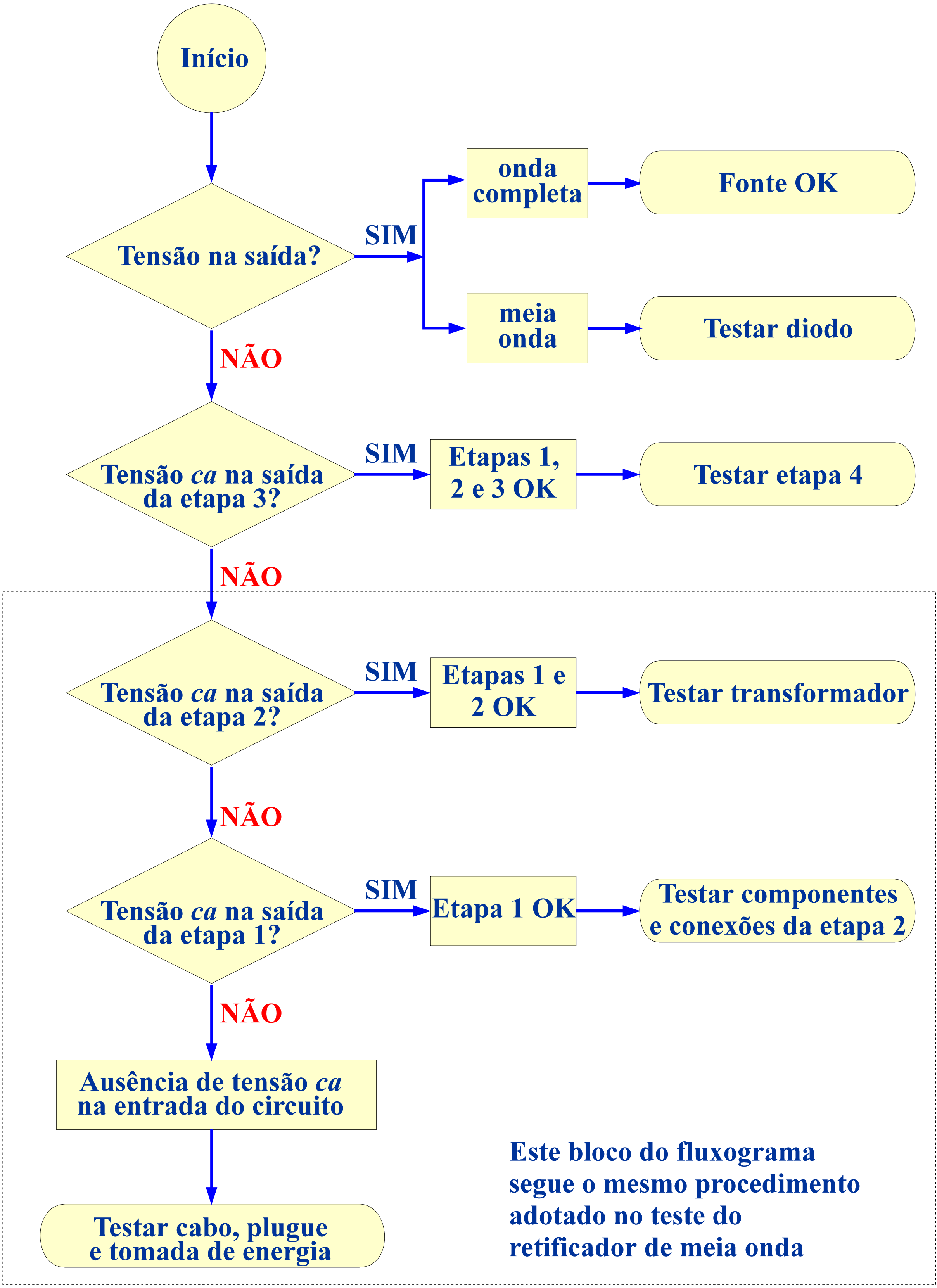


Fig.27 Fluxograma para execução de testes em um retificador de onda completa.

Na execução dos testes, as seguintes considerações devem ser observadas:

- É possível determinar se a saída está retificada em meia onda através da medida de tensão, uma vez que

  Retificação de onda completa: $\Rightarrow V_{cc} = 0{,}9\,V_{ca}$
  Retificação de meia onda: $\Rightarrow V_{cc} = 0{,}45\,V_{ca}$

  Uma possibilidade de a saída se encontrar retificada em meia onda é a permanência de um dos diodos retificadores em aberto.

- Se o defeito na etapa 2 for fusível rompido, devem-se verificar as causas antes de se realizar a substituição. Possíveis causas podem ser : diodos em curto, curto entre ligações ou um curto na saída da fonte. O rompimento do fusível também pode ser provocado pelo funcionamento anormal do circuito alimentado pela fonte.

- **IMPORTANTE:** Em ambos os tipos de retificadores, um diodo em curto normalmente produz curtos nos diodos restantes. Verificada a possibilidade de existência de um diodo em curto, é prática comum fazer-se a troca de todos os diodos restantes, mesmo que estes não acusem defeito quando testados com um ohmímetro.

PONTES RETIFICADORAS COMERCIAIS

A configuração da ponte retificadora é muito empregada em equipamentos eletrônicos. Isso levou os fabricantes de diodos a produzir pontes retificadoras pré-fabricadas. Essas pontes nada mais são do que os 4 diodos já ligados entre si, encapsulados em um só componente. Na **Fig.28** é mostrado o aspecto de duas pontes retificadoras disponíveis comercialmente.

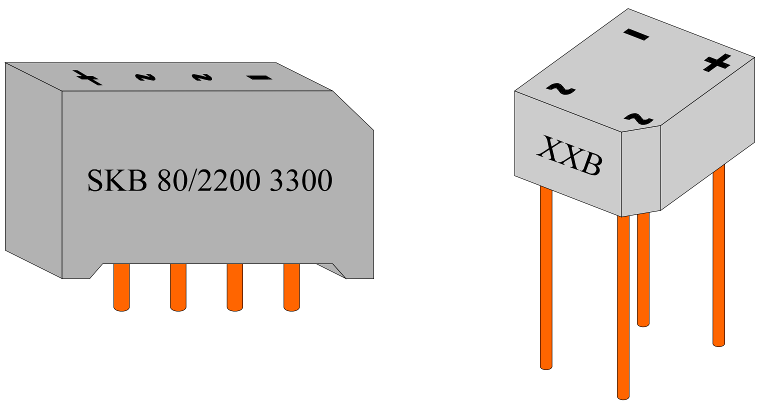


Fig.28 Aspecto de dois *chips* retificadores disponíveis comercialmente.

O componente disponível comercialmente tem quatro terminais, dois dos quais utilizados para a entrada da tensão *ca* com os dois restantes servindo para a saída da tensão *cc*. Os terminais de entrada em *ca* são normalmente identificados pelo símbolo (~) sendo os de saída em *cc* identificados pelos símbolos (+) e (–), conforme indicado na **Fig.28**.

As designações inscritas nos encapsulamentos mostrados na **Fig.28** referem-se às características da ponte, de acordo com a seguinte convenção:

XX	—	duas letras que indicam o fabricante.
B	—	do alemão *Brücken* (ponte).
40	—	valor limite de tensão *ca* em Volts que pode ser aplicada à entrada da ponte.
1000/1800	—	corrente média em mA que pode ser obtida na saída do componente, onde: 1.000 – com carga puramente resistiva na saída. 1.800 – com carga puramente capacitiva na saída.

A **Fig.29** mostra o aspecto de uma fonte de alimentação montada com uma ponte retificadora comercial.

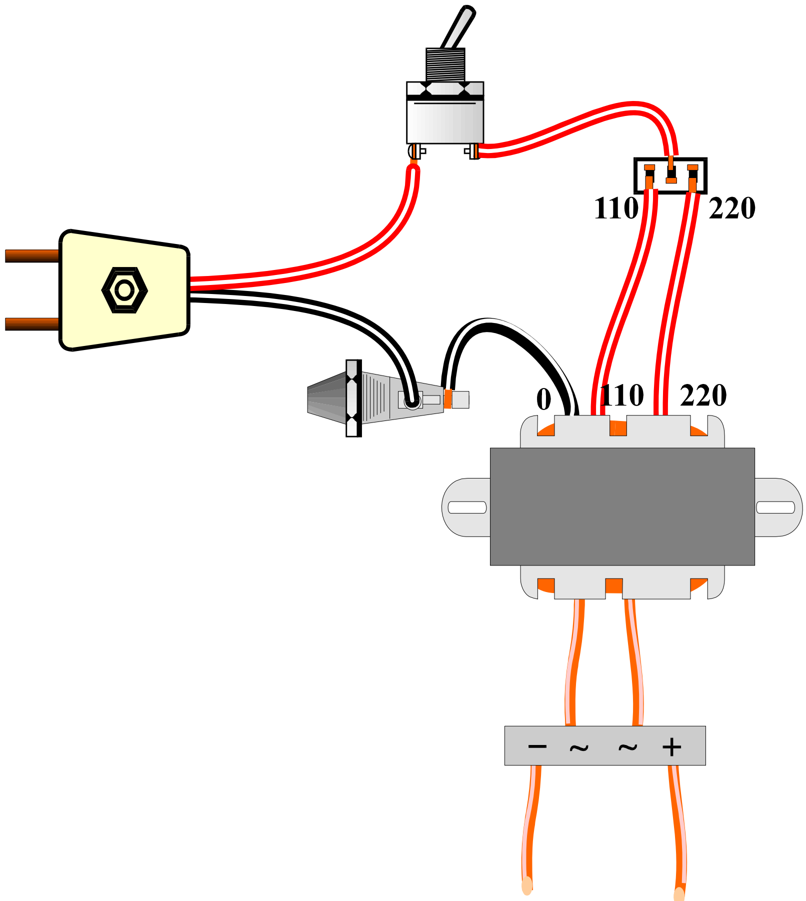


Fig.29 Montagem de uma fonte de alimentação utilizando ponte retificadora.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. O que é retificação de onda completa?
2. Como se compara o rendimento de um retificador de onda completa em relação ao rendimento de um retificador de meia onda?
3. Quais os valores da tensão média e da tensão efetiva medidas na carga de um retificador de onda completa de derivação central submetido a uma entrada senoidal de 3 V? Admita que os diodos sejam de silício.
4. Repita a questão anterior para o caso de um retificador de onda completa com ponte de quatro diodos.
5. Quais são as vantagens do retificador em ponte em relação ao retificador com derivação central?

BIBLIOGRAFIA

CIPELLI, Antônio Marco Vicari & SANDRINI, Valdir João. Teoria do desenvolvimento de Projetos de Circuitos Eletrônicos . 7.ª ed. São Paulo, Érica, 1983, 580pp.

DEGEM SYSTEMS . Fontes de alimentação eletrônicas. Israel, Eletrônica Modular Pantec, c1976, 49pp. ilust.

FIGINI, Gianfranco. Eletrônica Industrial; circuitos e aplicações. São Paulo, Hemus, c1982, 336pp.

SENAI/ Departamento Nacional. Reparador de circuitos eletrônicos; eletrônica básica II. Rio de Janeiro, Divisão de Ensino e Treinamento, c1979 (Coleção Básica Senai, Módulo 1).

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Introdução

Os circuitos retificadores de meia onda e onda completa fornecem uma tensão de saída consistindo em uma série de pulsos de mesmo sinal produzindo, assim, um fluxo de corrente unidirecional através da carga. No entanto, muitos equipamentos de corrente contínua necessitam de uma alimentação cuja variação no tempo seja tão pequena quanto possível. Para eliminar essa limitação, adiciona-se um filtro na saída do circuito retificador comum, como forma de minimizar as variações no tempo dos níveis da tensão e da corrente de saída.

Este fascículo tratará das técnicas normalmente empregadas na obtenção da filtragem do processo de retificação, com o objetivo de capacitar o leitor a empregar essas técnicas na construção de fontes com um maior grau de pureza na saída.

Para a boa compreensão do conteúdo e desenvolvimento das atividades contidas neste fascículo, o leitor deverá estar familiarizado com os conceitos relativos a:

* Armazenamento de energia em capacitores.
* Retificação de meia onda.
* Retificação de onda completa.

Filtros em fontes de alimentação

A tensão contínua pura se caracteriza por ter uma única polaridade e por um valor que não varia ao longo do tempo, como mostrado no gráfico da **Fig.1**.

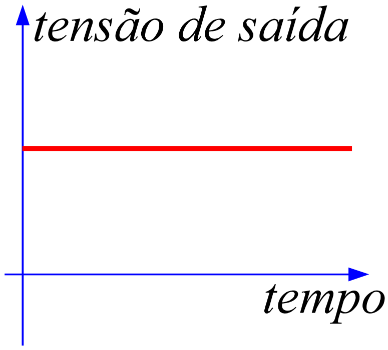


Fig.1 Tensão puramente contínua como função do tempo.

A tensão de saída produzida pelos circuitos retificadores, tanto de meia onda como de onda completa, toma a forma de uma série de pulsos. A **Fig.2** mostra esse tipo de tensão de saída para o caso do retificador de onda completa. Como pode ser aí observado, embora os pulsos de tensão sejam de mesma polaridade, existe uma variação no tempo do valor da tensão de saída.

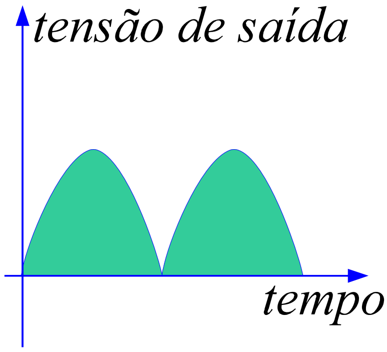


Fig.2 Dependência no tempo da tensão de saída de um retificador de onda completa.

Salvo em algumas situações, como por exemplo na saída dos carregadores de bateria convencionais, a tensão pulsada fornecida pelos circuitos retificadores comuns não é apropriada para uso em circuitos mais sofisticados cuja operação demanda um alto grau de pureza na tensão contínua de alimentação.

Essa deficiência presente no retificador comum é resolvida pelo emprego de um filtro conectado entre a saída do retificador e a carga, conforme ilustrado na **Fig.3**. O filtro atua no sentido de aproximar a tensão na carga, tanto quanto possível, da tensão contínua ideal, de valor constante como mostrado no gráfico da **Fig.1**.

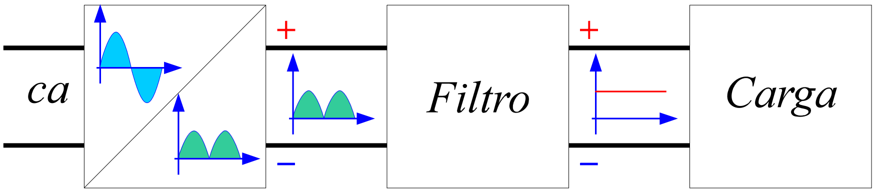


Fig.3 Diagrama de blocos de um circuito retificador com filtro na saída.

O CAPACITOR COMO ELEMENTO DE FILTRAGEM

A capacidade de armazenamento de energia elétrica dos capacitores pode ser utilizada como recurso para realizar um processo de filtragem na tensão de saída de um circuito retificador. Essa filtragem é realizada conectando-se o capacitor diretamente nos terminais de saída do circuito retificador, como mostrado nos dois diagramas da **Fig.4**.

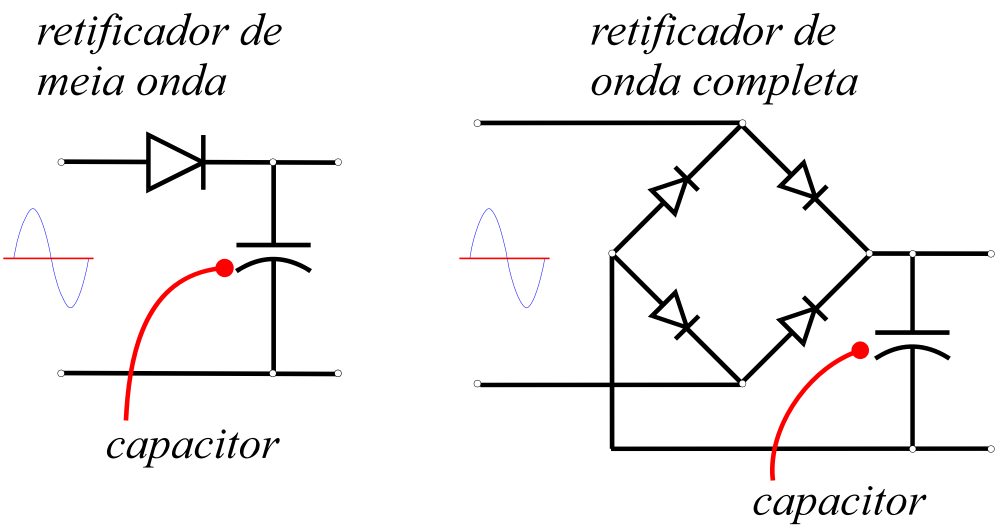


Fig.4 Circuitos retificadores de meia onda e onda completa com capacitor de saída.

Considere, por exemplo, a operação do retificador de meia onda com capacitor de saída. Nos intervalos de tempo em que o diodo entra em regime de condução, uma parte da corrente flui através da carga com a parte restante fluindo para o capacitor, como mostrado na **Fig.5**.

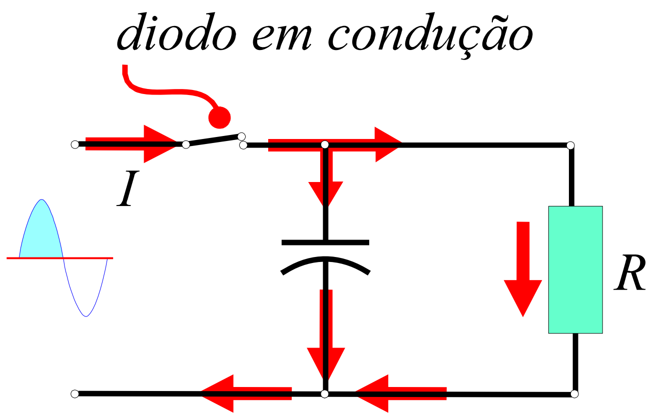


Fig.5 Operação do retificador de meia onda com capacitor de saída durante o regime de condução.

Nesses intervalos de tempo, carga elétrica é transferida da armadura conectada ao cátodo do diodo para a segunda armadura do capacitor.

Nos intervalos de tempo em que o diodo opera no regime de bloqueio, o capacitor inicia o processo de transferência da carga elétrica da armadura negativa para a positiva. Com o circuito retificador em bloqueio, não é possível a ocorrência de um fluxo de corrente através do circuito retificador. Conseqüentemente, a corrente produzida pela descarga do capacitor flui através do resistor de carga, conforme ilustrado na **Fig.6**.

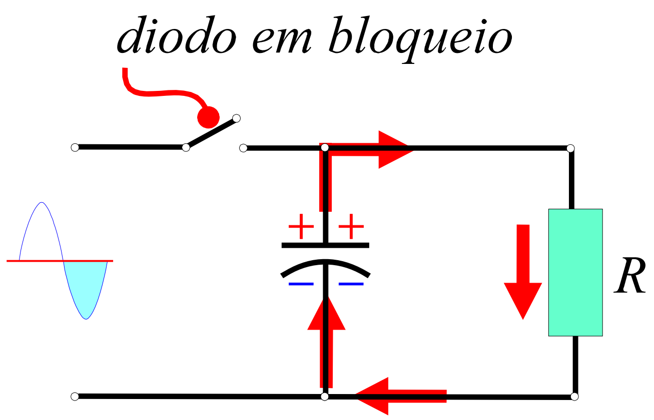


Fig.6 Operação do retificador de meia onda com capacitor de saída durante o regime de bloqueio.

Por estar em paralelo com o capacitor, o resistor de carga fica sempre submetido à mesma diferença de potencial existente entre as armaduras do capacitor. À medida que ocorre a descarga do capacitor, a diferença de potencial entre as armaduras diminui, como mostrado na **Fig.7**.

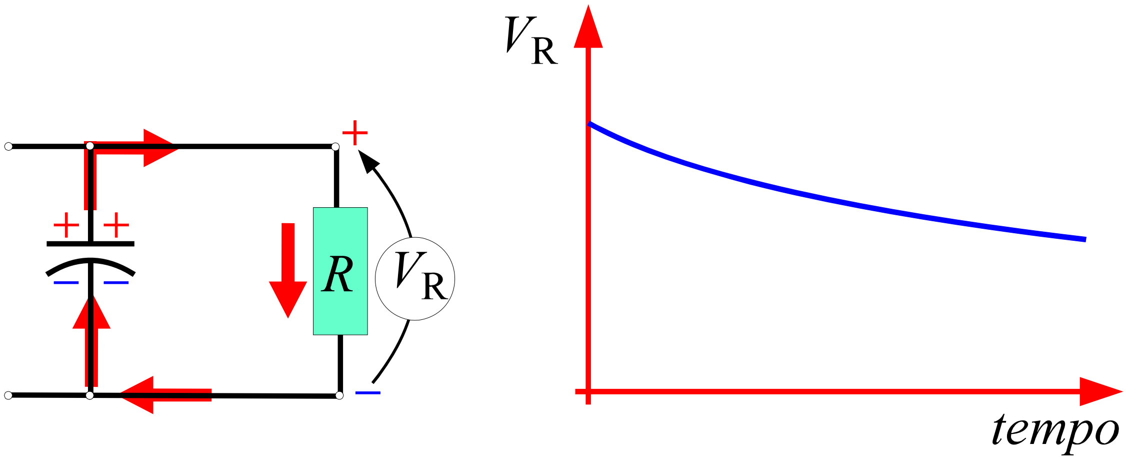


Fig.7 Tensão de saída do circuito retificador durante o processo de descarga do capacitor.

Esse processo de descarga continua até o momento em que a tensão na entrada atinje um valor V_1 suficiente para colocar o diodo novamente no regime de condução, como mostrado na **Fig.8**. Este valor V_1 é exatamente igual à tensão no capacitor após um certo intervalo de tempo de descarga. A partir desse instante de tempo, o ânodo do diodo torna-se positivo em relação ao cátodo, e a carga elétrica armazenada na armadura positiva do capacitor começa novamente a aumentar.

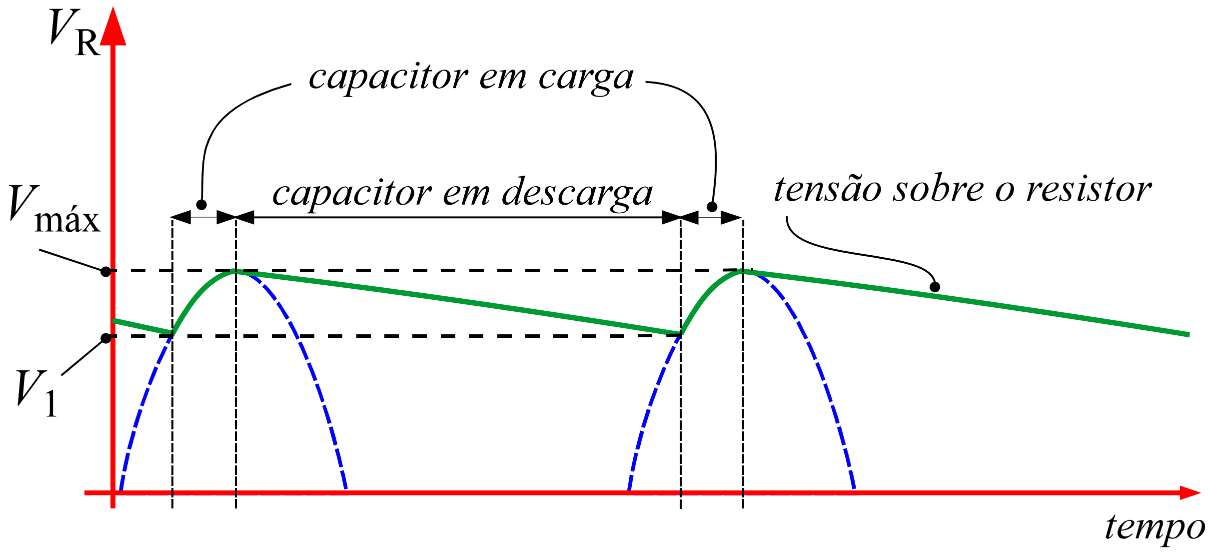


Fig.8 Gráfico da tensão de saída do retificador de meia onda com filtro capacitivo.

Observando-se o gráfico da **Fig.8**, nota-se que o diodo permanece em condução até o instante em que a tensão de entrada atinge o valor máximo $V_{máx}$. Dessa forma, a colocação do capacitor permite que a tensão de saída, embora variável, permaneça sempre próxima ao valor máximo $V_{máx}$, obtendo-se efetivamente um aumento no valor médio da tensão de saída.

O aumento no valor médio da tensão no resistor de carga pode ser observado comparando-se os gráficos das tensões de saída do circuito retificador com e sem filtro capacitivo, conforme ilustrado na **Fig.9.**

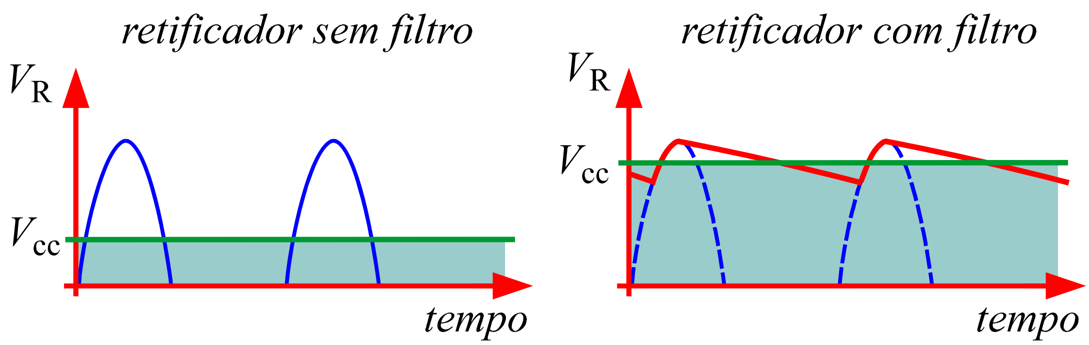


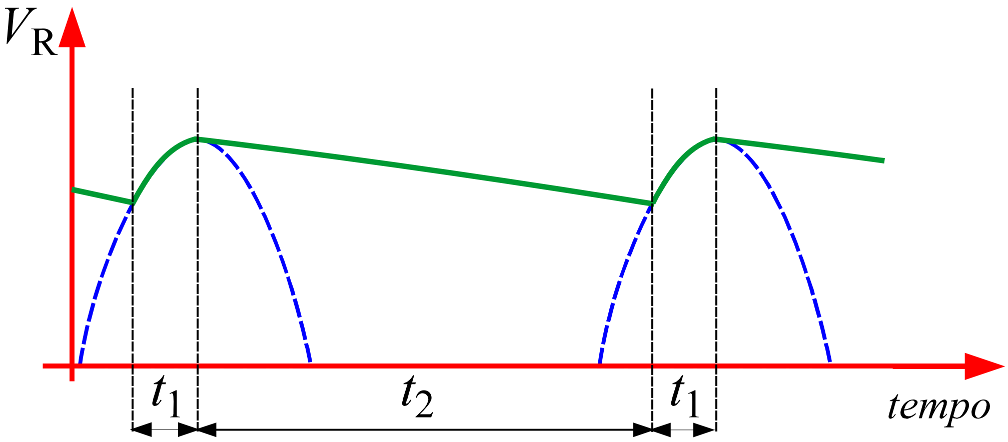
Fig.9 Comparação das tensões de saída do circuito retificador de meia onda com e sem filtro capacitivo.

A colocação de um capacitor na saída de um circuito retificador aumenta o valor da tensão média na carga.

TENSÃO DE ONDULAÇÃO

O capacitor na saída do circuito retificador sofre sucessivos processos de carga e descarga. Nos períodos de condução do diodo o capacitor sofre carga e sua tensão aumenta, enquanto nos períodos de bloqueio o capacitor descarrega e sua tensão diminui.

Os intervalos de tempo t_1 e t_2 indicados na **Fig.10** definem as durações dos processos de carga e descarga, respectivamente.



t_1 = intervalo de tempo do processo de carga do capacitor.
t_2 = intervalo de tempo do processo de descarga do capacitor.

Fig.10 Definição dos tempos de carga e descarga do capacitor.

Como se pode observar no gráfico da **Fig.11,** a tensão de saída não assume o valor constante característico de uma tensão puramente contínua, variando no tempo entre os valores extremos V_1 e $V_{máx}$. Essa variação na tensão de saída é denominada de ***ondulação***, termo derivado do inglês ***ripple***.

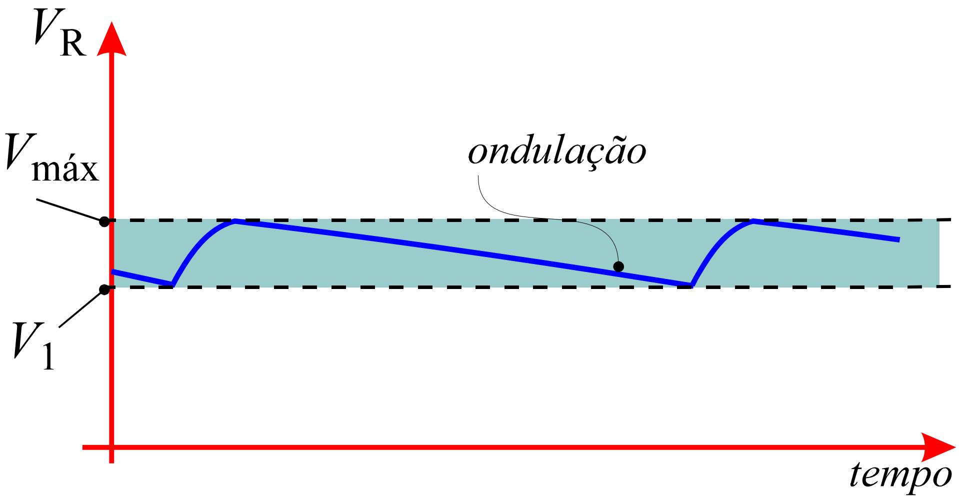


Fig.11 Ondulação na tensão de saída do circuito retificador de meia onda com filtro capacitivo.

Ondulação ou ripple, é a variação observada na tensão de saída do circuito retificador com filtro capacitivo.

A diferença entre os valores $V_{\text{máx}}$ e V_1 é definida como a ***tensão de ondulação*** V_{ond}. Este parâmetro, definido no gráfico da **Fig.12**, assume a expressão matemática,

$$V_{\text{ond}} = V_{\text{máx}} - V_1 \qquad (1)$$

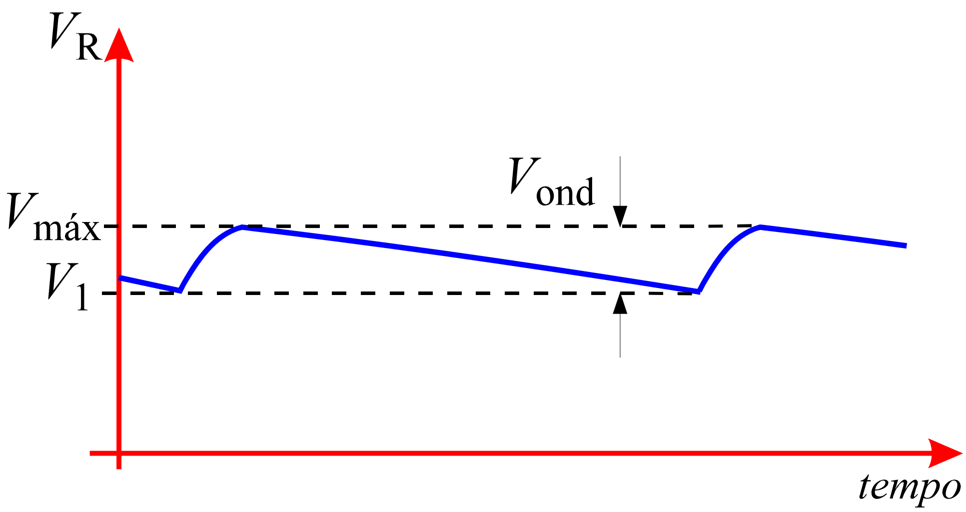


Fig.12 Tensão de ondulação na saída do retificador de meia onda com filtro capacitivo.

A tensão de ondulação de uma fonte retificada é uma medida da ***componente alternada*** presente na saída da fonte. O valor dessa componente alternada serve como parâmetro de avaliação da qualidade de um circuito retificador.

Quanto menor o valor da componente alternada presente na saída de uma fonte retificadora melhor é sua qualidade.

FATORES QUE INFLUENCIAM A ONDULAÇÃO

A ondulação na saída de um circuito retificador depende fundamentalmente dos três fatores descritos a seguir.

Capacidade de armazenamento do capacitor

A capacidade de armazenamento de um capacitor é proporcional ao valor de sua capacitância. Fixado o valor da resistência de carga, um maior valor da capacitância implica um processo de descarga mais lento e, conseqüentemente, uma menor tensão de ondulação.

Resistência de carga

Quanto maior for o valor da resistência de carga, menor será a corrente suprida pelo capacitor durante o processo de descarga. Dessa forma, a carga elétrica armazenada na armadura positiva do capacitor diminui mais lentamente na descarga, resultando em uma menor tensão de ondulação.

Tipo de circuito retificador

Fixados os valores da resistência de carga e da capacitância do circuito retificador, a tensão de ondulação fica dependente apenas do tipo de circuito retificador. Como mostrado na **Fig.13,** no circuito retificador de onda completa o capacitor é carregado duas vezes a cada ciclo da tensão de entrada. Esse tipo de circuito opera, portanto, com a metade do tempo do retificador de meia onda, exibindo assim uma menor tensão de ondulação.

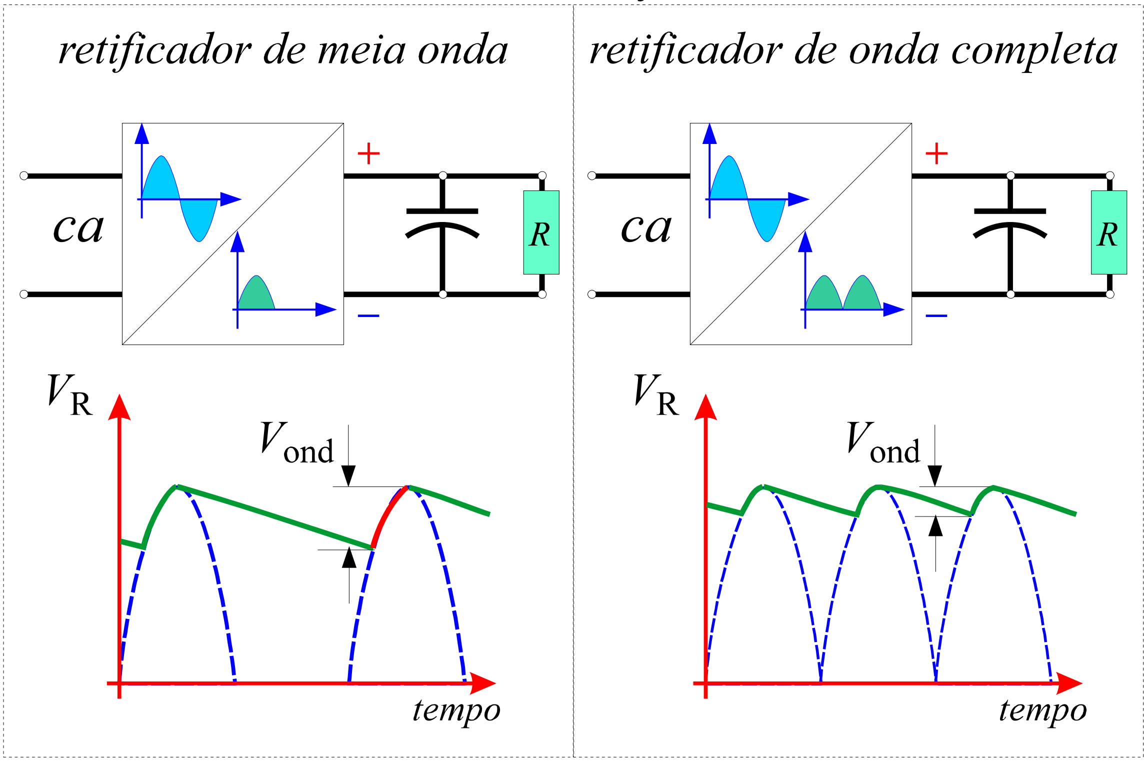


Fig.13 Gráficos das tensões no capacitor de saída dos retificadores de onda completa e de meia onda.

TENSÃO DE SAÍDA NO RETIFICADOR COM FILTRO CAPACITIVO

A tensão média V_{cc} no capacitor de saída de um circuito retificador de onda completa ou de meia onda pode ser calculada a partir da expressão

$$V_{cc} = V_{máx} - \frac{V_{ond}}{2} \qquad (2)$$

onde $V_{máx}$ é o valor máximo da tensão de entrada, que é relacionada ao valor *ca* por

$$V_{cc} = \sqrt{2}\,V_{ca} \qquad (3)$$

e V_{ond} é a tensão de ondulação já definida anteriormente.

Na ausência de um resistor de carga, ou equivalentemente com a saída em aberto, o capacitor nunca descarrega. Nessas condições, V_{ond} = 0 e da **Eq.(2)**, tem-se que

$$V_{cc} = V_{máx} = \sqrt{2}\,V_{ca}$$

A tensão de saída nesse caso assume a forma mostrada no gráfico da **Fig.14**, tanto para o retificador de onda completa quanto para o de meia onda.

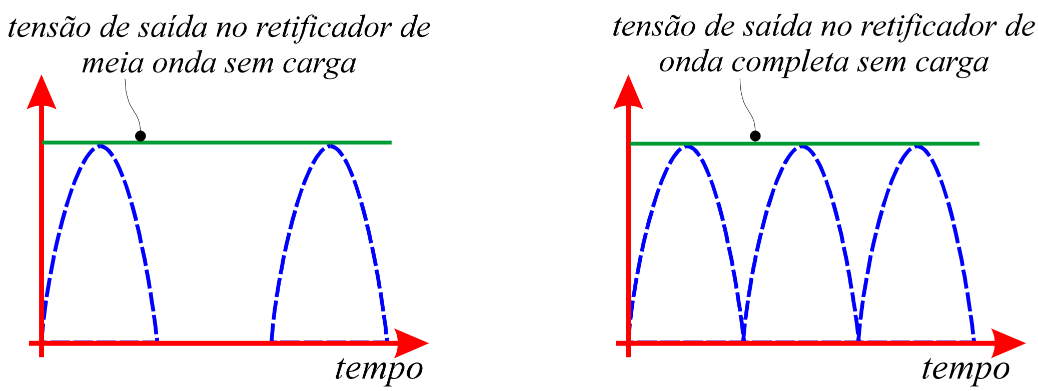


Fig.14 Tensões de saída dos retificadores de onda completa e meia onda, na ausência de carga.

Na ausência de um resistor de carga, as tensões de saída dos circuitos retificadores de meia onda e de onda completa com filtro capacitivo não variam no tempo.

O exemplo seguinte ilustra o comportamento da tensão de saída de um circuito retificador de meia onda com filtro como função do resistor de carga.

<u>Exemplo 1:</u> Analisar o comportamento de um circuito retificador de meia onda: (a) Na ausência de um resistor de carga e (b) na presença de um resistor de carga que provoque uma tensão de ondulação de 3V.

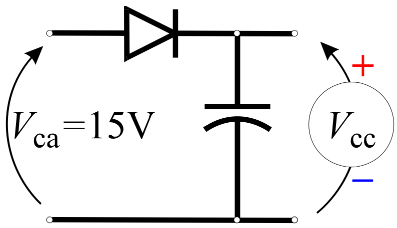


Fig.15 Circuito retificador para o **Exemplo 1**.

Com base na **Fig.15,** na ausência de um resistor de carga, a tensão de saída é constante, sendo dada por

$$V_{cc} = \sqrt{2}\, V_{ca}$$

Com V_{ca} =15 V obtém-se,

$$V_{cc} = \sqrt{2} \times 15 = 21{,}2\ \text{V}$$

Esse comportamento pode ser observado conectando-se um osciloscópio em modo *dc* na saída da fonte retificadora. A forma de onda observada seria constante conforme mostrado na **Fig.16**.

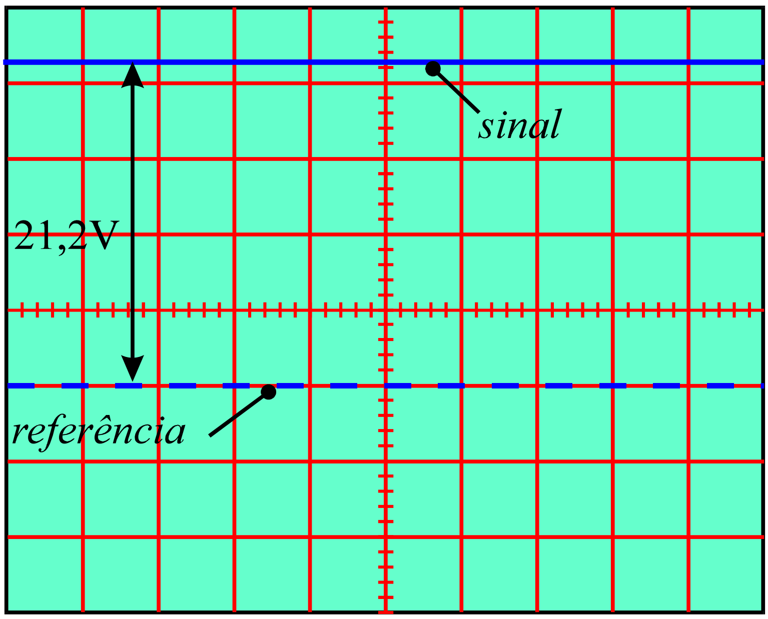


Fig.16 Forma de onda de saída para o circuito retificador da **Fig.15**.

(b) Com um resistor na saída, conforme mostrado na **Fig.17**, aparece uma ondulação na tensão de saída. Admitindo-se que a tensão de ondulação seja V_{ond} = 3 V, o uso da **Eq.(2)** fornece

$$V_{cc} = 15 \times \sqrt{2} - \frac{3}{2} = 21{,}2 - 1{,}5$$

$$\Rightarrow V_{cc} = 19{,}7 \text{ V}$$

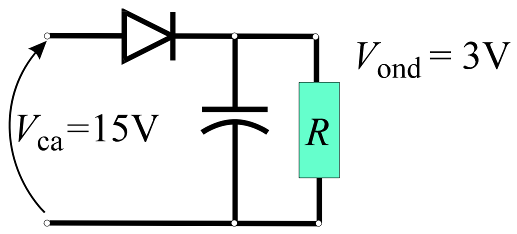


Fig.17 Circuito retificador conectado a uma carga.

A tensão *cc* na saída diminui portanto de 1,5 V devido à presença do resistor de carga.

A forma de onda da saída, observada na tela do osciloscópio, operando em modo *dc*, seria aquela mostrada na **Fig.18**.

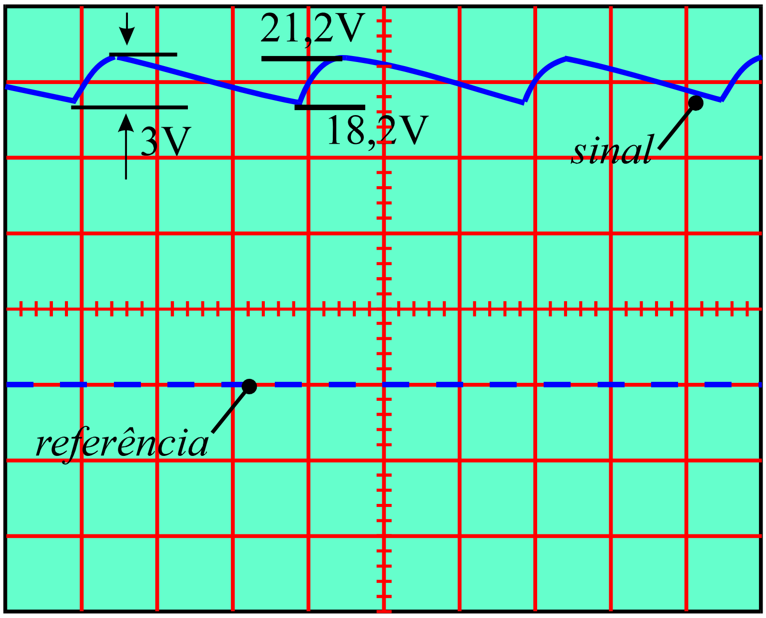


Fig.18 Forma de onda de saída para o circuito retificador da **Fig.17**.

OBSERVAÇÃO DA ONDULAÇÃO COM OSCILOSCÓPIO

A ondulação é uma componente alternada presente na tensão de saída de uma fonte retificadora com filtro capacitivo conectado a um resistor de carga. Em situações de interesse prático, o valor da tensão de ondulação é normalmente inferior a 10% do valor V_{cc}. Com esse valor reduzido, torna-se difícil a medição precisa da tensão de ondulação por intermédio de um osciloscópio que esteja operando em modo *dc*.

Para obter uma medida precisa do parâmetro V_{ond}, deve-se utilizar o osciloscópio no modo *ac*, pois elimina-se a componente *cc* na saída da fonte retificadora, possibilitando que apenas a componente alternada seja visualizada na tela do osciloscópio.

A **Fig.19** ilustra o que se observa na tela de um osciloscópio conectado à saída de uma fonte retificadora com filtro capacitivo operando nos modos *dc* e *ac*. Note-se que para operação no modo *ac*, o ganho vertical pode ser aumentado de forma a permitir uma caracterização precisa da ondulação da fonte retificadora.

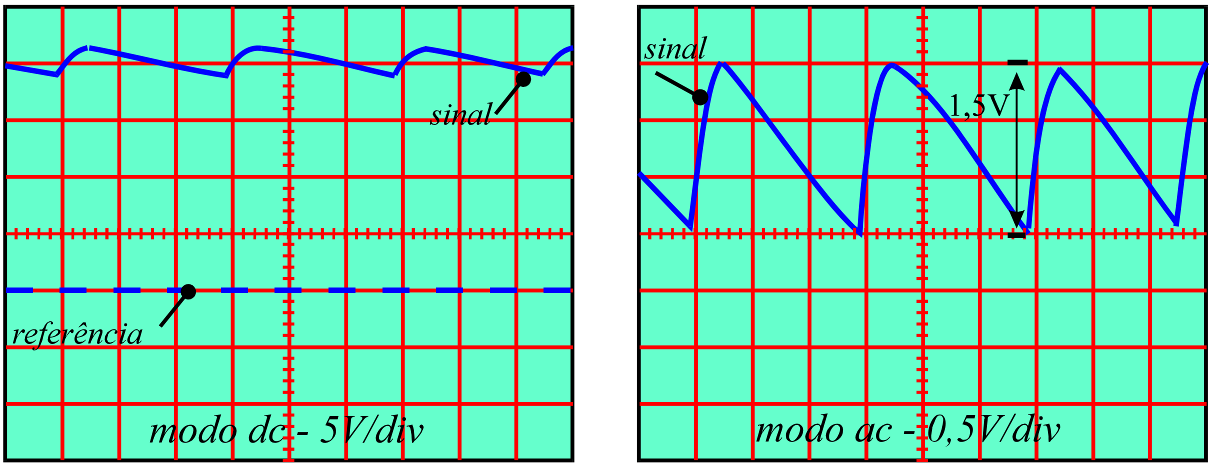


Fig.19 Tensão no capacitor de saída de uma fonte retificadora observada na tela de um osciloscópio operando nos modos *dc* e *ac*.

Para medir com precisão o valor da tensão de ondulação no capacitor de saída de uma fonte retificadora, deve-se utilizar o modo de operação ac do osciloscópio.

ESPECIFICAÇÃO DO FILTRO CAPACITIVO

De acordo com a **Eq.(2)**, a tensão no capacitor de saída de uma fonte retificadora depende da tensão de ondulação. Esta, por sua vez, depende do tipo de circuito retificador, do valor da capacitância do filtro e do resistor de carga ou equivalentemente da corrente na carga. Essa dependência torna difícil a obtenção de uma expressão exata que possibilite a determinação da capacitância do filtro para operação em um valor V_{cc} pré-especificado.

Entretanto, devido à grande tolerância nos valores de capacitância dos capacitores eletrolíticos, que pode chegar a 50% do valor nominal, pode-se formular uma expressão simplificada para obtenção de um valor adequado da capacitância do filtro. Essa expressão pode ser utilizada no projeto do filtro capacitivo, sem introduzir erro significativo em situações em que a tensão de ondulação seja inferior a 20% do valor V_{cc} . Nessas condições, a capacitância do filtro pode ser obtida da expressão

$$C = T \frac{I_{\text{máx}}}{V_{\text{ond}}} \qquad (4)$$

onde:

- V_{ond} = Tensão de ondulação medida em Volts
- $I_{máx}$ = Corrente máxima na carga em mA
- T = Período aproximado da descarga do capacitor
- C = Valor da capacitância do filtro em μF

Para uma freqüência *ac* de 60 Hz utiliza-se :

- T = 16,6 ms para um retificador de meia onda
- T = 8,33 ms para um retificador de onda completa

A seguir são apresentados dois exemplos de dimensionamento do filtro capacitivo com o emprego da **Eq.(4)**.

Exemplo 2: Deseja-se montar uma fonte retificadora de meia onda com tensão de saída de 12V, corrente de 150mA, e com ondulação de 2V. Assumindo a freqüência da rede elétrica de 60 Hz, determinar a capacitância.

Utilizando T = 16,6 ms, $I_{máx}$ = 150 mA e V_{ond} = 2 V, o uso da **Eq.(4)** fornece

$$C = 16{,}6 \times \frac{150}{2} \quad \Rightarrow \quad C = 1245\,\mu\text{F}$$

Exemplo 3: Repetir o **Exemplo 2** para o caso de um circuito de onda completa.

Neste caso, utiliza-se na **Eq.(4)** o valor T = 8,33 ms, que fornece

$$C = 8{,}33 \times \frac{150}{2} \quad \Rightarrow \quad C = 625\,\mu\text{F}$$

Ao se projetar uma fonte retificadora, além do valor da capacitância do filtro, deve-se, também, especificar sua tensão de isolação. A tensão de isolação deve ser sempre superior ao maior valor da tensão de operação do capacitor.

FILTRO CAPACITIVO IDEAL

O filtro capacitivo ideal seria aquele que possibilitasse a obtenção de uma tensão de saída não ondulada. Certamente este tipo de capacitor deveria exibir uma capacidade de armazenamento de carga elétrica elevadíssima para poder manter a tensão de saída absolutamente constante. Nota-se, portanto, que a utilização prática de um filtro capacitivo que produza pequena ondulação na saída requer uma certa ponderação:

Diminuir o percentual de ondulação implica no uso de filtros de alta capacitância, que além de serem mais volumosos, aumentam o custo do projeto.

Na prática, os filtros capacitivos normalmente utilizados na construção de fontes retificadoras são do tipo eletrolítico, pois esse tipo de filtro apresenta um alto valor de capacitância por unidade de volume.

Vale também observar que, se a tensão de ondulação de uma fonte retificadora é elevada demais para alimentação de um determinado equipamento, utilizam-se normalmente circuitos eletrônicos destinados especificamente à regulação da tensão de alimentação, evitando, assim, a necessidade de alteração do filtro capacitivo.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Qual o objetivo de utilização de um filtro na saída de um retificador?
2. O que ocorre com a tensão média na carga quando se coloca um capacitor em paralelo com a saída de um retificador?
3. O que é ondulação?
4. Qual a relação entre ondulação e qualidade de uma fonte retificadora?
5. Que fatores influenciam a ondulação?
6. Qual a tensão média na saída de um retificador de meia onda, com filtro, submetido a uma tensão de entrada com $V_{máx}$ = 10 V para uma tensão de ondulação de 1 V?
7. Que modo de operação deve ser utilizado em um osciloscópio para medição precisa da tensão de ondulação na saída de uma fonte retificadora com filtro?
8. Por que se utilizam capacitores eletrolíticos na construção de fontes retificadoras?

BIBLIOGRAFIA

ARNOLD, Roberts & BRANDT, Hans. Retificadores semicondutores não controlados. São Paulo, E. P. U., 1975, 49pp. il. (Eletrônica Industrial, 1).

CIPELLI, Antônio Marco Vicari & SANDRINI, Waldir João. Teoria e desenvolvimento de projetos de circuitos eletrônicos. 8.ª ed., São Paulo, Érica, 1984, 580pp. il.

SENAI/DN. Reparador de circuitos eletrônicos; Eletrônica Básica II. Rio de Janeiro, Divisão de Ensino e Treinamento, 1979 (Coleção Básica SENAI, Módulo 1).

TRAINING PUBLICATIONS DIVISION OF PERSONEL PROGRAM SUPPORT ACTIVITY. Curso de eletrônica. São Paulo, Hemus, c1975, 178pp.

VAN VALKENBURG, NOOGER & NEVILLE. Eletrônica básica. 6.ª ed. Rio de Janeiro, Freitas Bastos, c1974, v.6.

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Introdução

Um requisito básico para que um aparelho eletrônico tenha um desempenho ótimo é a correta escolha e dimensionamento da fonte de alimentação. A fonte precisa ter condições de suprir a tensão e corrente necessárias ao bom funcionamento do equipamento, mesmo sob condições adversas de operação.

O propósito deste fascículo é analisar os parâmetros de importância na escolha do tipo de fonte de alimentação. Serão discutidos alguns aspectos referentes ao dimensionamento dos componentes, com o objetivo de capacitar o leitor a optar corretamente pelo modelo de circuito adequado a cada situação.

Para a boa compreensão do conteúdo e desenvolvimento das atividades contidas neste fascículo, o leitor deverá estar familiarizado com os conceitos relativos a:

- Circuitos retificadores.
- Filtros em fontes de alimentação.

Comparação entre circuitos retificadores

PARÂMETROS DE DESEMPENHO

A retificação de *ca* pode ser feita em meia onda ou em onda completa, com ou sem filtro, com cada uma das configurações tendo características próprias. Os desempenhos obtidos a partir das diferentes formas de retificação, podem ser comparados analisando-se o comportamento da **tensão de saída com carga**, o **percentual de ondulação** e o **fator de regulação**, definidos nas seções seguintes.

TENSÃO DE SAÍDA

Na ausência de um resistor de carga, os circuitos retificadores de meia onda e de onda completa com filtro capacitivo, exibem uma tensão de saída que não varia no tempo, conforme ilustrado na **Fig.1**.

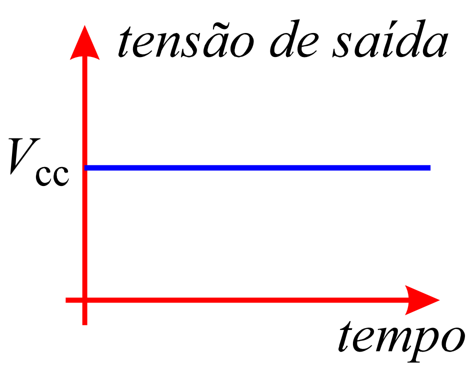


Fig.1 Tensões de saída dos retificadores de onda completa e meia onda, na ausência de carga.

Entretanto, quando carga é conectada aos terminais de saída, os circuitos fornecem tensões de saída distintas, conforme mostrado na **Fig.2**. Como pode ser aí observado, em meia onda a ondulação é praticamente duas vezes maior do que na retificação em onda completa. Isso ocorre pelo fato de em meia onda o tempo de descarga do capacitor ser quase o dobro daquele obtido na retificação em onda completa.

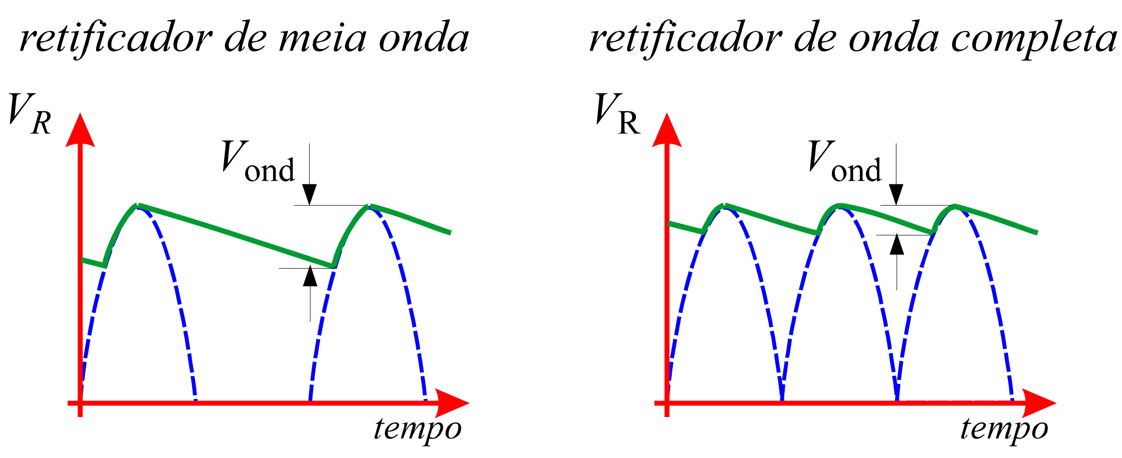


Fig.2 Gráficos das tensões no capacitor de saída dos retificadores de onda completa e de meia onda.

Como a tensão *cc* na saída de ambos os circuitos é relacionada a tensão de ondulação pela expressão

$$V_{cc} = V_{máx} - \frac{V_{ond}}{2} \qquad (1)$$

conclui-se que a menor ondulação na retificação de onda completa implica em uma tensão *cc* superior àquela obtida com a retificação em meia onda.

PERCENTUAL DE ONDULAÇÃO

A ondulação é uma característica presente na tensão de saída de todas as fontes de alimentação. Isso ocorre devido à não-existência de um filtro capacitivo ideal que possa eliminar a componente alternada presente na saída.

Como a qualidade de uma fonte de alimentação pode ser avaliada pelo grau de ondulação na tensão de saída, esse atributo pode ser quantificado definindo-se um **percentual de ondulação**. Este parâmetro é definido como o valor eficaz da componente alternada relativa à tensão *cc*, com ambos os valores

medidos na saída da fonte. O percentual de ondulação assim definido é expresso matematicamente na forma

$$\%\,\text{ond} = \frac{V_{\text{ondef}}}{V_{\text{cc}}} \times 100 \tag{2}$$

onde:

- $\%\,\text{ond}$ ⇒ representa o percentual de ondulação;
- V_{ondef} ⇒ representa o valor eficaz da componente alternada;
- V_{cc} ⇒ representa a tensão *cc* de saída com carga máxima.

Os percentuais de ondulação para os dois tipos de fontes retificadoras, sem filtro capacitivo, assumem valores fixos que independem da carga. Estes percentuais são os seguintes:

- Retificador de meia onda sem filtro ⇒ % ond = 121%
- Retificador de onda completa sem filtro ⇒ % ond = 48%

Esses números indicam que fontes retificadoras de meia onda e onda completa sem filtro de saída têm um percentual de ondulação muito elevado. Isso limita o emprego dessas configurações a circuitos que não necessitam de tensões contínuas muito puras.

O uso do filtro capacitivo na saída das fontes retificadoras reduz o percentual de ondulação sensivelmente devido ao efeito de armazenamento de carga elétrica do capacitor. Nessa situação, o percentual de ondulação torna-se dependente das especificações do filtro, da carga e do tipo de circuito de retificação.

Nas fontes retificadoras com filtro de saída, a tensão de ondulação V_{ond} definida na **Fig.2** se relaciona com o valor efetivo correspondente pela expressão aproximada

$$V_{\text{ondef}} = \frac{V_{\text{ond}}}{\sqrt{12}} \tag{3}$$

Inserindo a **Eq.(3)** na **Eq.(2)**, permite que o percentual de ondulação seja expresso na forma

$$\%\,\text{ond} = \frac{V_{\text{ond}}}{V_{\text{cc}} \times \sqrt{12}} \times 100 \tag{4}$$

As fontes de alimentação de boa qualidade têm um percentual de ondulação em torno de 5%. O exemplo a seguir ilustra o emprego da **Eq.(4)**.

Exemplo 1: Uma fonte retificadora fornece, com carga máxima, uma tensão *cc* de 11 V. Sabendo-se que a tensão de ondulação é 1,5 V, determine o percentual de ondulação da fonte.

Utilizando os valores, $V_{cc} = 11$ V e $V_{ond} = 1{,}5$ V na **Eq.(4),** obtém-se,

$$\%\,\text{ond} = \frac{1{,}5}{11 \times \sqrt{12}} \times 100 = \frac{1{,}5}{38{,}11} \times 100 = 0{,}039 \times 100$$

$$\Rightarrow \%\,\text{ond} = 3{,}9\%$$

O valor obtido indica que essa fonte poderia ser considerada de boa qualidade.

FATOR DE REGULAÇÃO

O fator de regulação é um parâmetro que expressa a capacidade de uma fonte de manter a tensão *cc* de saída constante na presença de variações da corrente de carga. O fator de regulação é definido matematicamente pela expressão

$$R\% = \frac{V_{cc}\,(\text{s/c}) - V_{cc}}{V_{cc}} \times 100 \qquad (5)$$

onde :

- $R\%$ ⇒ representa o valor percentual do fator de regulação;
- V_{cc}(s/c) ⇒ representa a tensão *cc* de saída medida na ausência de carga;
- V_{cc} ⇒ representa a tensão *cc* de saída medida com carga máxima.

O fator de regulação também é um parâmetro que define a qualidade de uma fonte. Fontes com fator de regulação de até 10% podem ser consideradas de boa qualidade.

O exemplo a seguir ilustra a utilização da **Eq.(5)** na determinação do fator de regulação de uma fonte.

Exemplo 2: Um circuito retificador fornece uma tensão contínua de 6 V quando sem carga. Esse valor se reduz a 5,6 V quando a fonte opera com carga nominal. Qual é o fator de regulação dessa fonte ?

Utilizando os valores, $V_{cc}(s/c) = 6$ V e $V_{cc} = 5{,}6$ V na **Eq.(5)**, obtém-se

$$R\% = \frac{6 - 5{,}6}{5{,}6} \times 100 = \frac{0{,}4}{5{,}6} \times 100 = 0{,}071 \times 100$$

$$\Rightarrow R\% = 7{,}1\%$$

PESQUISA DE DEFEITOS EM FONTES COM FILTRO

Na retificação de meia onda com filtro, pode-se facilmente determinar se o circuito está funcionando corretamente, **desligando-se a carga**, conforme ilustrado na **Fig.3** e medindo-se :

- A tensão *ca* imediatamente antes do diodo;
- A tensão *cc* de saída.

A fonte estará operando corretamente se os valores medidos V_{cc} e V_{ca} obedecerem à relação

$$V_{cc} = \sqrt{2}\, V_{ca}$$

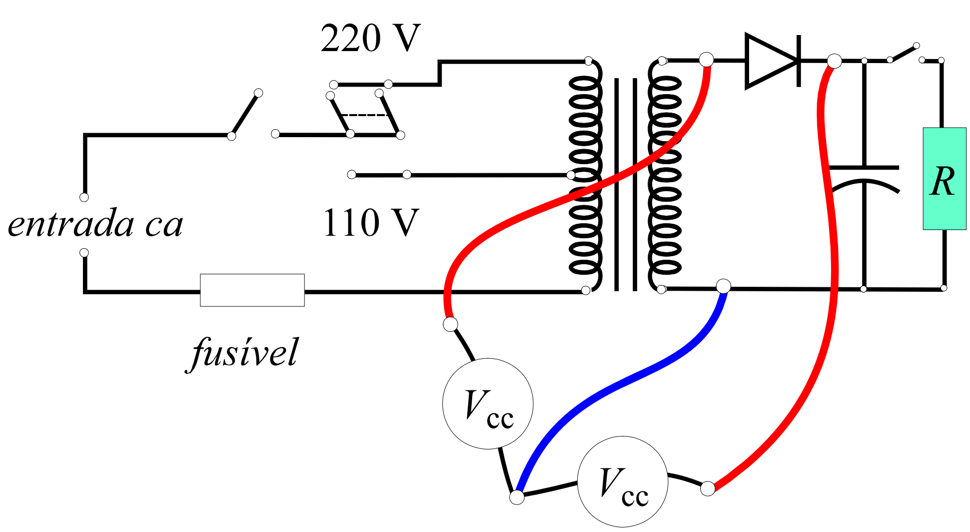


Fig.3 Circuito retificador de meia onda com filtro de saída e parâmetros de medição.

Caso seja constatado algum defeito, testa-se em primeiro lugar o filtro capacitivo, desligando-se um dos seus terminais e medindo-se a capacitância com um ohmímetro. Caso o capacitor esteja em boas condições, testa-se o restante do circuito. Esse último teste deve ser realizado mantendo-se o capacitor desligado do circuito de forma que este opere como um retificador de meia onda sem filtro.

Para o circuito retificador de onda completa, a medição apenas das tensões V_{cc} e V_{ca} não pode ser utilizada para determinar se o circuito está operando adequadamente. Isso ocorre pois diferenças de valores da tensão de saída são difíceis de detectar mesmo que haja a possibilidade de danificação de um dos diodos do circuito.

Devido a essa dificuldade, o teste do retificador de onda completa com filtro de saída deve obedecer ao procedimento mais detalhado descrito no fluxograma da **Fig.4**.

Um defeito no filtro capacitivo, seja pela existência de um curto ou de uma corrente de fuga através de seus terminais, pode causar defeitos nos diodos. Por isso, antes da religação do circuito, deve-se executar a etapa de teste dos diodos, conforme indicado na **Fig.4**.

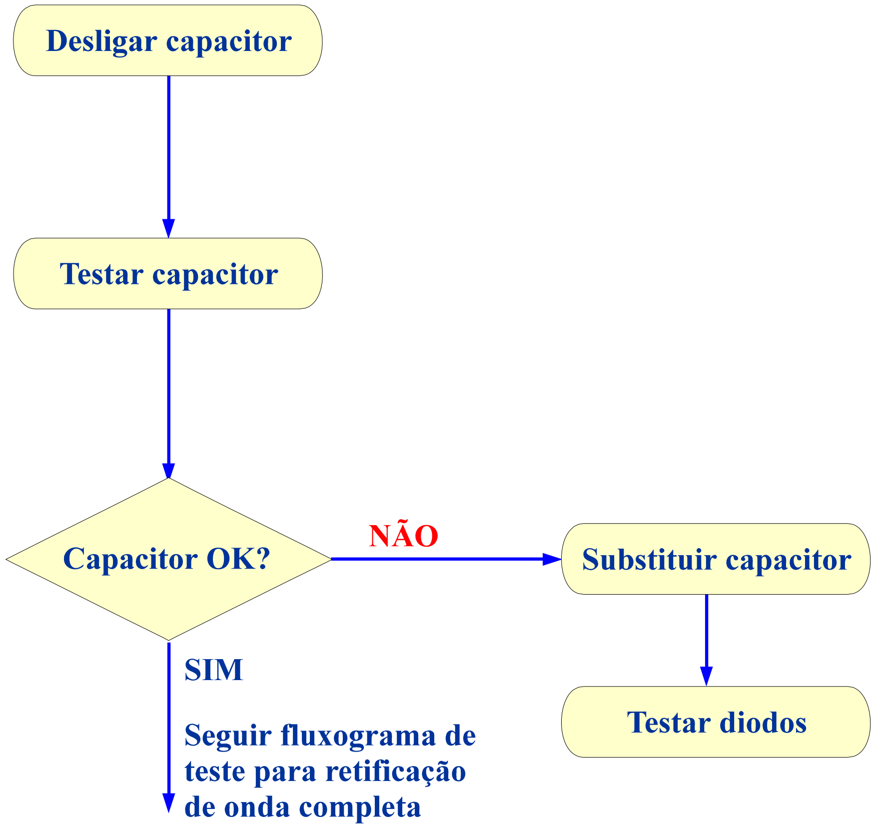


Fig.4 Fluxograma ilustrativo do procedimento de teste de um retificador de onda completa com filtro capacitivo.

LIMITES DE OPERAÇÃO DO DIODO

Os limites de operação de diodos em um circuito retificador são estabelecidos pela corrente de condução e pela tensão inversa através de seus terminais. Esses parâmetros são analisados nas seções seguintes.

TENSÃO INVERSA SOBRE O DIODO

O diodo de um circuito retificador está sujeito a um regime intermitente de ciclos de condução e bloqueio. Durante semiciclos de condução, a tensão sobre o diodo assume um valor típico que depende do material semicondutor. Na **Fig.5** estão indicados os valores típicos obtidos para o caso dos diodos de silício e de germânio.

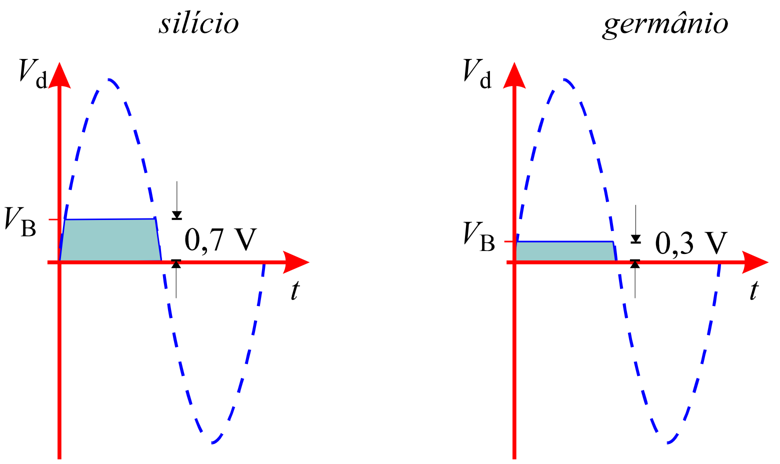


Fig.5 Tensão aplicada nos diodos de silício e de germânio durante o regime de condução.

Durante os semiciclos em que o diodo opera no regime de bloqueio, a forma senoidal da tensão *ca* é reproduzida através dos terminais do diodo, conforme mostrado na **Fig.6**. Como pode ser aí observado, é apenas durante esses semiciclos que a tensão através do diodo pode atingir o valor máximo $V_{máx}$ da tensão *ca*.

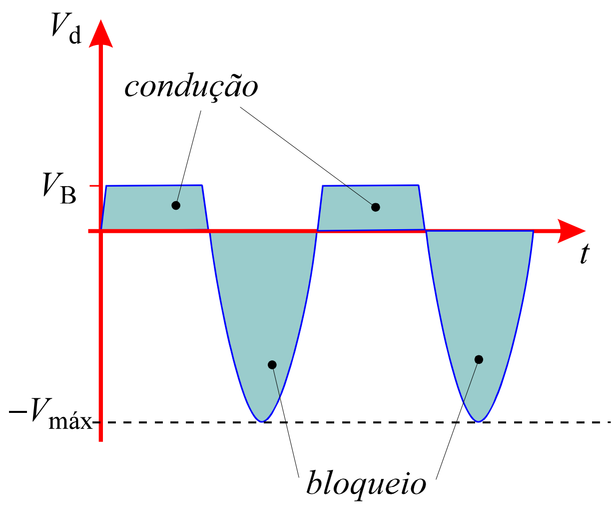


Fig.6 Tensão aplicada aos terminais do diodo durante os dois regimes de operação.

O folheto técnico fornecido pelo fabricante, estabelece o valor máximo de tensão inversa que o componente pode suportar a partir da especificação do parâmetro **VRWM.** Esta sigla é a abreviação na língua inglesa do termo, **tensão inversa de trabalho máxima**. Valores do parâmetro VRWM de alguns diodos disponíveis comercialmente estão mostrados na **Tabela 1.**

Tabela 1 Valores típicos do parâmetro VRWM para alguns diodos comerciais.

DIODO	VRWM
1N4004	400V
SKE 1/12	1200V
BY 127	1250V

CORRENTE MÉDIA ATRAVÉS DO DIODO

Cada diodo compondo um circuito retificador conduz corrente em ciclos intermitentes, como ilustrado na **Fig.7**. Esses pulsos de corrente se traduzem em um valor médio I_{cc} para a corrente que flui através do diodo e, conseqüentemente, através da carga.

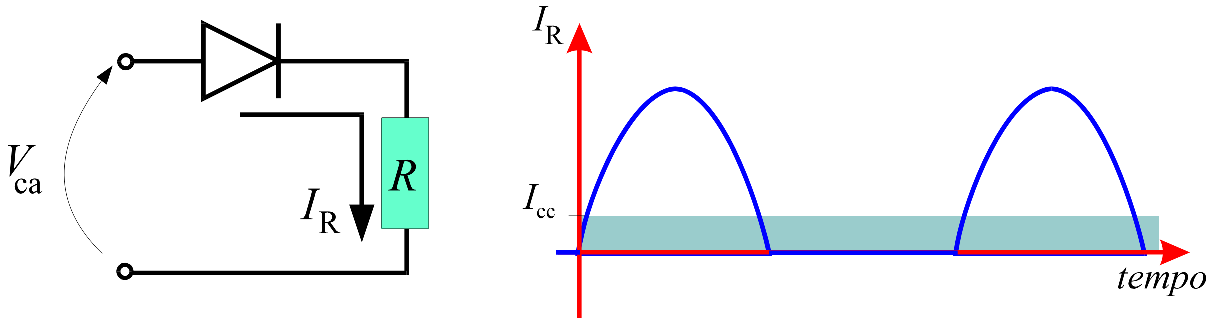


Fig.7 Circuito retificador simples e pulsos de corrente através do diodo.

O folheto técnico fornecido pelo fabricante, estabelece o **valor máximo da corrente média** que o componente pode suportar a partir da especificação do parâmetro $\mathbf{I_{FAV}}$. A sigla **FAV** é a abreviação do termo inglês *forward average* que, traduzido para a língua portuguesa, torna-se *média direta*.

Valores do parâmetro I_{FAV} de alguns diodos disponíveis comercialmente estão mostrados na **Tabela 2.**

Tabela 2 Valores típicos do parâmetro I_{FAV} para alguns diodos comerciais.

DIODO	I_{FAV}
1N4004	1 A
SKE 1/12	1,3 A
BY 127	1 A

CORRENTE MÁXIMA ATRAVÉS DO DIODO

Em circuitos retificadores com filtro capacitivo, o diodo retificador conduz apenas durante um pequeno intervalo de tempo, que corresponde ao tempo de carregamento do capacitor, conforme ilustrado no primeiro gráfico da **Fig.8**.

Durante o curto espaço de tempo em que o diodo conduz, o capacitor recebe toda a carga liberada durante o período de descarga. Isso faz que a corrente durante o regime de condução do diodo se torne bastante elevada.

O segundo gráfico da **Fig.8** ilustra a dependência no tempo da corrente através do diodo. Como pode ser aí observado, a corrente atinge um valor de pico em cada intervalo em que há condução através do diodo. Os catálogos e manuais de diodos sempre fornecem o máximo valor da corrente de pico para operação normal do componente.

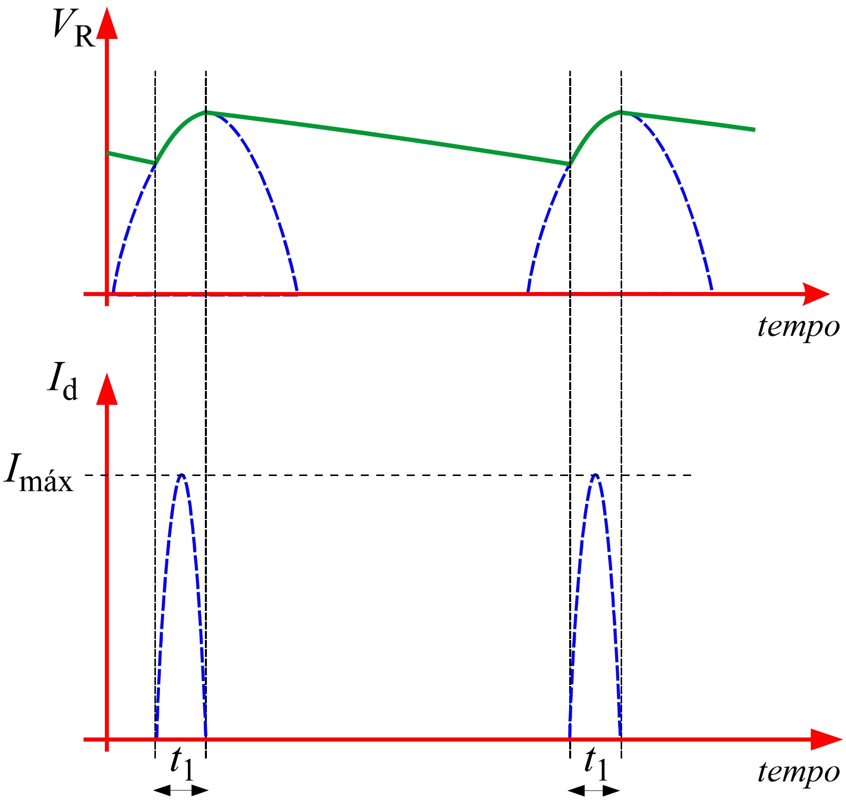


Fig.8 (a) Tensão de saída de um circuito retificador de meia onda com filtro capacitivo. **(b)** Dependência no tempo da corrente através do diodo.

Por ser dependente de vários parâmetros do circuito retificador, o valor da corrente de pico é difícil de ser determinado matematicamente. Porém, é sempre importante levar em consideração que quanto maior for a capacitância do filtro, tanto maior será o valor de pico da corrente através do diodo.

FÓRMULAS PARA CIRCUITOS RETIFICADORES

A **Tabela 3** fornece um resumo das equações utilizadas no cálculo dos principais parâmetros de fontes retificadoras. Os parâmetros aí utilizados são definidos a seguir:

- V_{cc}^{*} = Tensão *cc* na saída, desconsiderando a queda de tensão nos diodos.
- V_{cc} = Tensão *cc* na saída com carga máxima, e considerando a queda de tensão nos diodos.
- $V_{máx}$ = Tensão máxima *ca* aplicada a cada diodo.
- V_B = Queda de tensão típica em um diodo (0,3V ou 0,7V).
- V_{ond} = Tensão de ondulação medida entre os picos da forma de onda.
- % ond = Percentual de ondulação.
- $R\%$ = Fator de regulação.
- V_{cc}(s/c) = Tensão de saída sem carga.
- V_{RWM} = Tensão inversa de trabalho máxima em cada diodo.
- $I_{máx}$ = Corrente de carga máxima em mA.
- R = Resistência da carga em Ω.
- C = Capacitância do filtro em μF.
- I_R = Corrente de carga.
- I_{cc} = Corrente média através do diodo.

As expressões para as tensões de saída relacionadas na **Tabela 3** não levam em consideração a resistência interna dos transformadores. Essa resistência pode causar diferenças da ordem de 10% a menos nos valores calculados para as tensões de saída.

Os valores para as tensões inversas máximas, obtidos através das equações da **Tabela 3** são valores reais de operação dos diodos. Portanto, o diodo escolhido para compor um dado circuito retificador deve ser especificado com um valor de **tensão inversa de trabalho máxima** maior do que aquele calculado com o uso das expressões da **Tabela 3**.

Os circuitos numerados na primeira coluna da **Tabela 3** são definidos a seguir :

- <u>Circuito 1</u>: Retificador de meia onda sem filtro.
- <u>Circuito 2</u>: Retificador de onda completa com derivação central sem filtro.
- <u>Circuito 3</u>: Retificador de onda completa em ponte sem filtro.
- <u>Circuito 4</u>: Retificador de meia onda com filtro capacitivo.
- <u>Circuito 5</u>: Retificador de onda completa com derivação central e filtro capacitivo.
- <u>Circuito 6</u>: Retificador de onda completa em ponte com filtro capacitivo.

Tabela 3 Fórmulas utilizadas no cálculo de parâmetros dos circuitos retificadores.

Circuito	V^*_{cc}	V_{cc}	% ond	$R\%$	C (μF)	V_{RWM}	I_{cc}
1	$\frac{V_{máx}}{\pi}$	$\frac{V_{máx}-V_B}{\pi}$	121%	—	—	$V_{máx}$	$\frac{V_{cc}}{R}$
2	$\frac{2V_{máx}}{\pi}$	$2\frac{V_{máx}-V_B}{\pi}$	48%	—	—	$2V_{máx}$	$\frac{V_{cc}}{2R}$
3	$\frac{2V_{máx}}{\pi}$	$2\frac{V_{máx}-2V_B}{\pi}$	48%	—	—	$V_{máx}$	$\frac{V_{cc}}{2R}$
4	$V_{máx}-\frac{V_{ond}}{2}$	$V_{máx}-\left(V_B+\frac{V_{ond}}{2}\right)$	$\frac{100V_{ond}}{\sqrt{12}V_{cc}}$	$100\frac{V_{cc}(s/c)-V_{cc}}{V_{cc}}$	$\frac{16{,}6\,I_{máx}}{V_{ond}}$	$2V_{máx}$	$\frac{V_{cc}}{2R}$
5	$V_{máx}-\frac{V_{ond}}{2}$	$V_{máx}-\left(V_B+\frac{V_{ond}}{2}\right)$	$\frac{100V_{ond}}{\sqrt{12}V_{cc}}$	$100\frac{V_{cc}(s/c)-V_{cc}}{V_{cc}}$	$\frac{8{,}33\,I_{máx}}{V_{ond}}$	$2V_{máx}$	$\frac{V_{cc}}{2R}$
6	$V_{máx}-\frac{V_{ond}}{2}$	$V_{máx}-\left(2V_B+\frac{V_{ond}}{2}\right)$	$\frac{100V_{ond}}{\sqrt{12}V_{cc}}$	$100\frac{V_{cc}(s/c)-V_{cc}}{V_{cc}}$	$\frac{8{,}33\,I_{máx}}{V_{ond}}$	$V_{máx}$	$\frac{V_{cc}}{2R}$

A seguir são apresentados dois exemplos de utilização das fórmulas listadas na **Tabela 3**.

Exemplo 3: Determinar os parâmetros de operação de um circuito retificador de onda completa em ponte, sem filtro que utiliza diodos de silício, para uma tensão de entrada V_{ca} = 8 V e uma carga de 27 Ω.

Tensão de saída:

Com V_{ca} < 20V, deve-se considerar as quedas de tensão nos diodos

Portanto,

$$V_{cc} = \frac{2}{\pi}\left(V_{máx} - 2V_B\right) = \frac{2}{\pi}\left(\sqrt{2}\,V_{ca} - 2V_B\right) = \frac{2}{\pi}\left(\sqrt{2} \times 8 - 2 \times 0{,}7\right)$$

$$V_{cc} = \frac{2}{\pi}\left(1{,}41 \times 8 - 1{,}4\right) = \frac{2}{\pi}\left(1{,}41 \times 8 - 1{,}4\right) = \frac{2 \times 9{,}9}{3{,}14} = \frac{19{,}8}{3{,}14}$$

$$\Rightarrow V_{cc} = 6{,}3\ \text{V}$$

Percentual de ondulação:

De acordo com a **Tabela 3,** tem-se que $\%\ ond = 48\%$

Tensão inversa de trabalho em cada diodo:

Utilizando a **Tabela 3,** $V_{RWM} = V_{máx}$ e, portanto,

$$\Rightarrow V_{RWM} = 11{,}3\ \text{V}$$

Corrente média em cada diodo:

$$I_{cc} = \frac{V_{cc}}{2R} = \frac{6{,}3}{2 \times 27} = \frac{6{,}3}{54} = 0{,}117\ \text{A}$$

$$\Rightarrow I_{cc} = 117\ \text{mA}$$

Com base no que foi calculado, poder-se-iam utilizar diodos com as seguintes características:

$$V_{RWM} = 25\ \text{V}\,,\ I_{FAV} = 200\ \text{mA}$$

Exemplo 4: Determinar os parâmetros de operação de um circuito retificador de onda completa com derivação central em ponte, com filtro de saída, que utiliza diodos de silício, para uma tensão de entrada V_{ca} = 35 V, que produza um máximo de corrente média na carga de 230 mA e uma tensão de ondulação de 5 V.

Tensão de saída:

Com V_{ca} > 10 V, a queda de tensão em cada diodo pode ser desprezada.

Portanto,

$$V_{cc} = V_{máx} - \frac{V_{ond}}{2} = \sqrt{2}\,V_{ca} - \frac{V_{ond}}{2} = 1{,}41 \times 35 - \frac{5}{2} = 49{,}4 - 2{,}5$$

$$\Rightarrow V_{cc} = 46{,}9\text{ V}$$

Percentual de ondulação:

De acordo com a **Tabela 3,** tem-se que

$$\%\text{ ond} = \frac{V_{ond}}{\sqrt{12}\,V_{cc}} \times 100 = \frac{100 \times 5}{3{,}46 \times 46{,}9} = \frac{500}{162{,}2}$$

$$\Rightarrow \%\text{ ond} = 3{,}1\%$$

Fator de regulação:

$$R\% = 100 \times \frac{V_{cc}\,(s/c) - V_{cc}}{V_{cc}}$$

Para o retificador de onda completa, $V_{cc}(s/c) = V_{máx}$ = 35 V, portanto

$$R\% = 100 \times \frac{49{,}4 - 46{,}9}{46{,}9} = \frac{100 \times 2{,}5}{46{,}9} = \frac{250}{46{,}9} \Rightarrow R\% = 5{,}3\%$$

Cálculo do filtro capacitivo:

Para o retificador de onda completa,

$$C = 8{,}33 \times \frac{I_{máx}}{V_{ond}} = 8{,}33 \times \frac{230}{5} = 8{,}33 \times 46 \Rightarrow C = 383\ \mu\text{F}$$

Para esse circuito, pode-se utilizar um capacitor de 470µF, 63V, disponível comercialmente.

Tensão inversa de trabalho em cada diodo:

Utilizando a **Tabela 3,** $V_{RWM} = 2V_{máx}$ e, portanto,

$$\Rightarrow V_{RWM} = 98{,}8 \text{ V}$$

Corrente média em cada diodo:

Para o retificador de onda completa, a corrente média em cada diodo é a metade da corrente média através da carga

Portanto,

$$I_{cc} = \frac{I_R}{2} = \frac{230}{2}$$

$$\Rightarrow I_{cc} = 115 \text{ mA}$$

Com base no que foi calculado, poder-se-iam utilizar diodos com as seguintes características:

$$V_{RWM} = 150 \text{ V} \;\;,\;\; I_{FAV} = 200 \text{ mA}$$

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Como se comparam as tensões de ondulação dos retificadores de meia onda e de onda completa, ambos com filtro de saída?

2. O que é percentual de ondulação?

3. Quais os valores do percentual de ondulação de fontes retificadoras de meia onda e de onda completa, sem filtro de saída?

4. Qual a expressão que relaciona a tensão de ondulação com o seu valor efetivo?

5. O que é fator de regulação e qual a expressão que o define? O que representa cada termo da expressão?

6. Qual o teste básico para determinação do correto funcionamento de uma fonte retificadora de meia onda com filtro de saída?

7. Que parâmetros são utilizados para caracterizar os limites de operação de um diodo?

BIBLIOGRAFIA

ARNOLD, Robert & Brandt, Hans. Retificadores semicondutores não controlados. São Paulo. E.P.U, 1975, 49pp. il. (Eletrônica Industrial, 1)

CIPELLI, Antônio Marco Vicari & Sandrini, Waldir João. Teoria e desenvolvimento de projetos de circuitos eletrônicos. 7.ª ed., São Paulo, Érica, 1983, 580pp.

DEGEM SYSTEMS. Fontes de alimentação eletrônicas. Israel, Eletrônica Modular, Hemus, c1976, 49pp. il.

FIGINI, Gianfranco. Eletrônica Industrial. Circuitos e aplicações. São Paulo , Hemus, c1982, 366pp.

SENAI/Departamento Nacional. Reparador de circuitos eletrônicos; eletrônica básica II. Rio de Janeiro, Divisão de Ensino e Treinamento, c1979 (Coleção Básica Senai, Módulo 1).

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Introdução

A maioria dos aparelhos eletrônicos faz uso de mostradores luminosos que são empregados para indicar, por exemplo, se um equipamento está ligado ou desligado; ou mesmo para exibir valores numéricos ou mensagens em painéis de calculadoras eletrônicas, telefones celulares etc. Esses mostradores luminosos são fabricados com base nas propriedades ópticas de alguns materiais semicondutores que podem emitir luz quando polarizados adequadamente. O componente que é fabricado com essas características é denominado de LED. Essa sigla é a abreviação do termo inglês *Light Emitting Diode*, ou Diodo Emissor de Luz, na língua portuguesa.

Este fascículo tratará das principais características e do princípio de funcionamento do diodo emissor de luz, com o objetivo de capacitar o leitor a utilizar esse componente em suas atividades.

Para a boa compreensão do conteúdo e desenvolvimento das atividades contidas neste fascículo, o leitor deverá estar familiarizado com os conceitos relativos a:

* Diodo semicondutor.

Diodo emissor de luz

O diodo emissor de luz é um tipo especial de junção semicondutora que emite luz quando diretamente polarizada. A sigla LED surgida do termo inglês *Light Emitting Diode*, é a denominação amplamente utilizada nas referências a esse componente.

A forma adotada para se representar o LED em diagramas de circuito é essa mostrada na **Fig.1.**

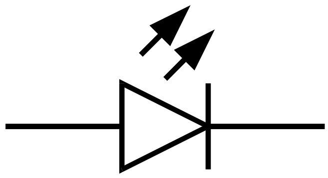


Fig.1 Representação de circuito de um diodo emissor de luz.

LEDs são encapsulados nas mais diversas configurações, algumas das quais estão ilustradas na **Fig.2.**

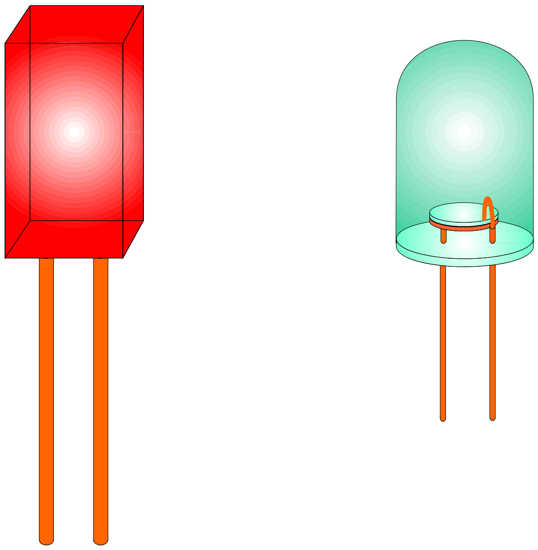


Fig.2 Alguns encapsulamentos típicos de LEDs.

O cátodo do LED pode ser identificado como sendo o terminal localizado próximo ao corte lateral na base do encapsulamento, conforme indicado na **Fig.3**.

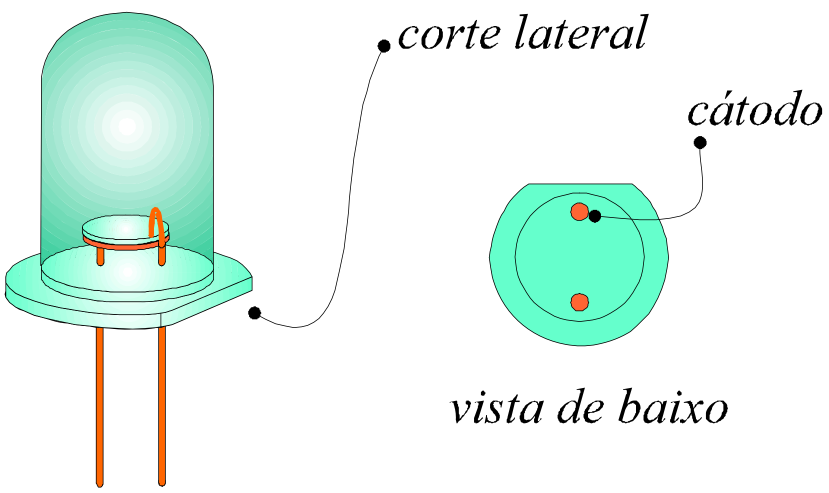


Fig.3 Identificação do cátodo de um tipo comum de LED.

LEDs são largamente utilizados como mostradores luminosos em uma variedade de equipamentos eletro/eletrônicos, em dispositivos de controle remoto, em sensores de alarmes residenciais ou industriais, ou mesmo como fontes de luz em sistemas de comunicações ópticas.

Dentre as características principais do diodo emissor de luz, pode-se destacar:

- Baixo consumo de energia.
- Imunidade a vibrações mecânicas.
- Pequenas dimensões.
- Alta durabilidade.

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Como ilustrado na **Fig.4**, quando o diodo emissor de luz é polarizado diretamente, entra em condução, permitindo a circulação de corrente.

A corrente através do LED se processa através da injeção de lacunas provenientes do lado *p* e de elétrons, do lado *n* da junção. Dessa forma, uma grande quantidade de elétrons e lacunas coexistem em uma estreita região nas proximidades da junção.

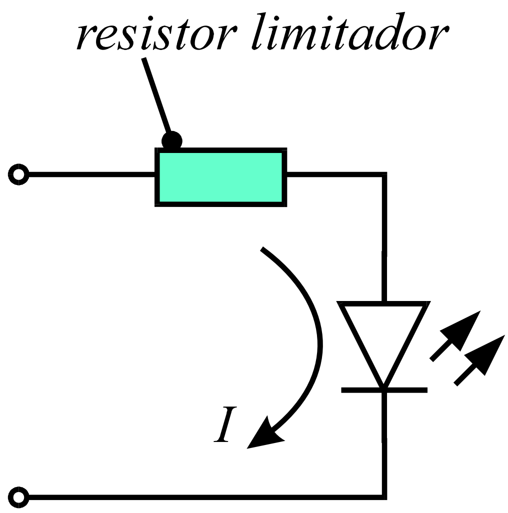


Fig.4 Diodo emissor de luz no regime de condução.

A coexistência de elétrons e lacunas possibilita a ocorrência de **processos de recombinação elétron/lacuna.** Recombinação é o nome que se dá ao processo de captura de elétrons por lacunas existentes nas ligações entre átomos do cristal semicondutor. Nesse processo, o elétron libera energia na forma de um fóton de luz, conforme ilustrado na **Fig.5**.

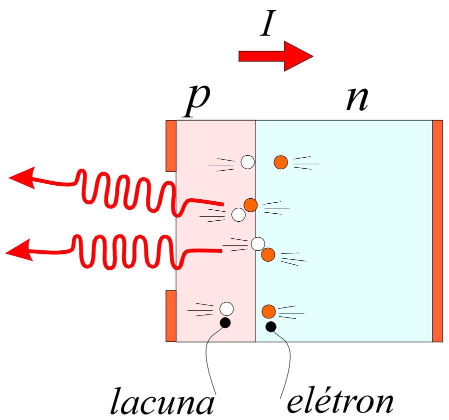


Fig.5 Emissão de fótons por processos de recombinação na junção *pn*.

PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DO LED

A seguir são apresentados alguns dos parâmetros de especificação de um LED.

CORRENTE DIRETA NOMINAL

A corrente direta nominal, denotada pelo parâmetro I_F é o valor de corrente de condução especificado pelo fabricante para o qual o LED apresenta

um rendimento luminoso ótimo. Esse valor é tipicamente 20mA para LEDs disponíveis comercialmente.

CORRENTE DIRETA MÁXIMA

A corrente direta máxima, denotada pelo parâmetro I_{FM}, corresponde ao valor máximo da corrente de condução que pode fluir através do LED, sem que este venha a sofrer ruptura estrutural.

TENSÃO DIRETA NOMINAL

A tensão direta nominal, denotada pelo parâmetro V_F é a especificação fornecida pelo fabricante para a queda da tensão típica através do LED quando a corrente de condução atinge o valor nominal I_F , como ilustrado na **Fig.6**.

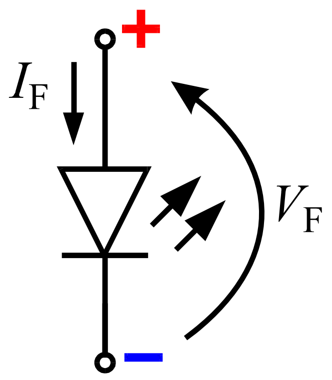


Fig.6 Queda de tensão e corrente nominais em um LED.

TENSÃO INVERSA MÁXIMA

A tensão inversa máxima, denotada pelo parâmetro V_R, é a especificação para o valor máximo da tensão inversa que pode ser aplicada ao LED sem que este venha a sofrer ruptura. A tensão inversa máxima em LEDs comerciais é tipicamente da ordem de 5V.

A **Tabela 1** lista as características de alguns LEDs disponíveis comercialmente.

Tabela 1 Parâmetros característicos de alguns LEDs comerciais.

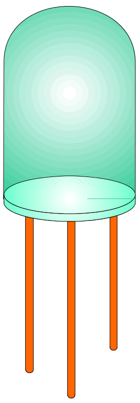
LED	**Cor**	**V_F (I_F = 20mA)**	**$I_{F\ máx}$**
LD 30C	vermelho	1,6V	100mA
LD 37I	verde	2,4V	60mA
LD 35I	amarelo	2,4V	60mA

O diodo emissor de luz pode ser testado seguindo o mesmo procedimento de teste do diodo comum; ou seja, com o emprego de um multímetro selecionado para medição de resistência. O painel do instrumento deve indicar valores de alta e baixa resistência ao se alternar a posição dos terminais de conexão do multímetro aos terminais do LED. Geralmente o LED acende durante o teste com polarização direta.

OUTROS TIPOS DE LEDs

LED BICOLOR

O LED bicolor consiste essencialmente de dois LEDs colocados em um único encapsulamento, conforme ilustrado na **Fig.7**. Esse dispositivo tem três terminais, um dos quais é comum a ambos os LEDs do encapsulamento. A cor da luz emitida pode ser selecionada alimentando-se o par de terminais referente a essa cor.



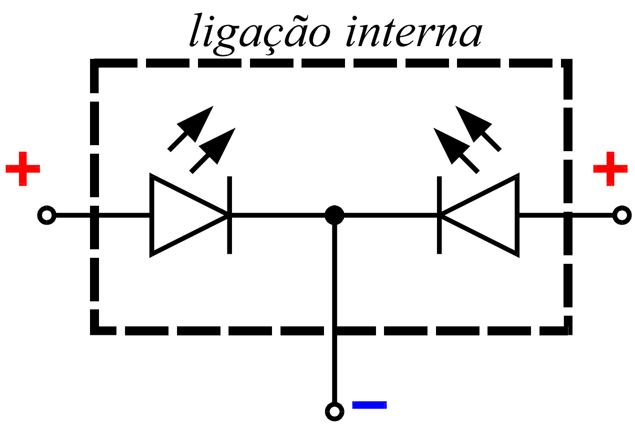


Fig.7 LED bicolor e representação de circuito das conexões elétricas.

LED INFRAVERMELHO

Existem LEDs que emitem luz no infravermelho, que é uma forma de radiação invisível ao olho humano. Apesar de não se poder observar a luz emitida de um LED infravermelho, esse dispositivo apresenta o mesmo princípio de funcionamento dos LEDs convencionais.

LEDs infravermelhos são utilizados principalmente em alarmes residenciais e industriais, em dispositivos de controle remoto e em sistemas de comunicações ópticas.

UTILIZAÇÃO DO LED

O emprego do LED em tensões contínuas exige a fixação da sua corrente direta nominal. A limitação da corrente pode ser feita através de um resistor conectado em série com o LED.

A **Fig.8** ilustra o diagrama de um circuito retificador de onda completa que utiliza um LED como indicador de fornecimento da tensão de saída do circuito.

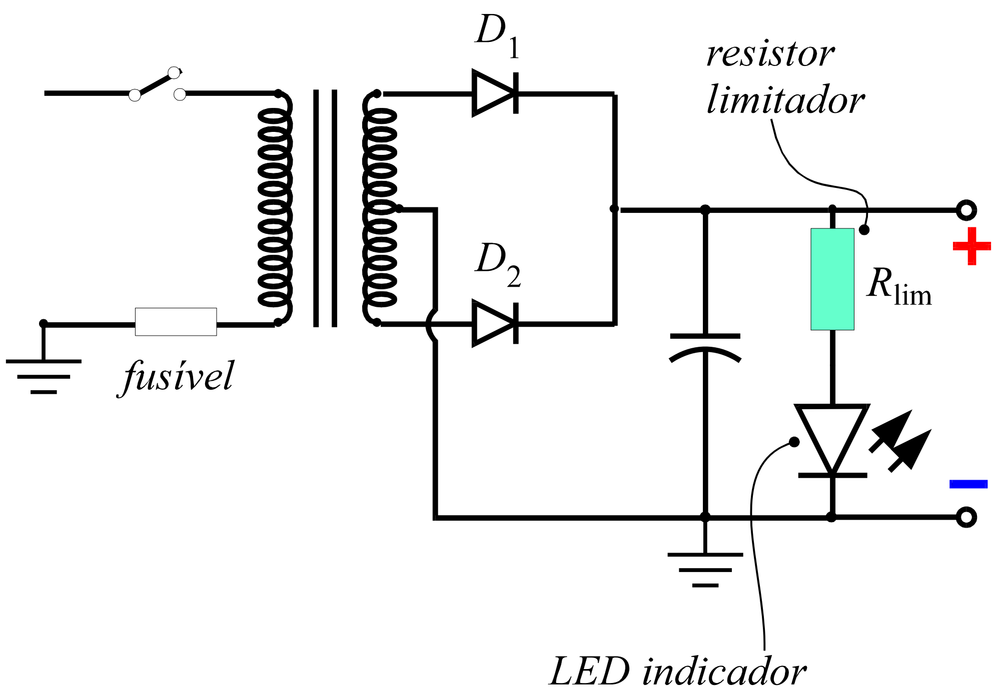


Fig.8 Circuito retificador de onda completa com LED indicador da tensão *cc*.

O valor de resistência do resistor limitador pode ser obtido da expressão

$$R_{\text{lim}} = \frac{V_{cc} - V_{B}}{I_{F}} \qquad (1)$$

onde

- V_{cc} = tensão de saída da fonte.
- V_{F} = tensão nominal de condução do LED.
- I_{F} = corrente nominal de condução do LED.

Exemplo 1: Determinar a resistência do resistor limitador para uma fonte que fornece uma tensão *cc* de 10 V, para utilização de um LED LD30C, como mostrador luminoso.

Da segunda linha da **Tabela 1**, tem-se que

$$V_{F} = 1{,}6 \text{ V} \ , \ I_{F} = 20 \text{ mA}$$

Utilizando o valor V_{cc}=10 V da **Tabela 1**, resulta,

$$R_{\text{lim}} = \frac{10 - 1{,}6}{0{,}02} = \frac{8{,}4}{0{,}02}$$

$$\Rightarrow \quad R_{\text{lim}} = 420 \ \Omega$$

Nessas condições, a potência dissipada no resistor seria,

$$P = (V_{cc} - V_{B}) \times I_{F} = (10 - 1{,}6) \times 0{,}02 = 8{,}4 \times 0{,}02$$

$$\Rightarrow \quad P = 168 \text{ mW}$$

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. O que é um diodo emissor de luz e qual a sigla utilizada para sua representação?

2. Quais as características principais de um diodo emissor de luz?

3. Qual a forma adequada de polarização de um diodo emissor de luz?

4. Que parâmetros são normalmente utilizados pelo fabricante para representar as condições e limites de operação de um diodo emissor de luz?

5. Que aplicações fazem uso do diodo emissor de luz que emite no infravermelho?

BIBLIOGRAFIA

CURSO DE SEMICONDUTORES; diodos emissores de luz. São Paulo. Nova Eletrônica, (38): 121-3, abr./80

DAMAYE, R. Optoeletrônica: Fundamentos teóricos y aplicaciones practicas Opto-electronique; bases théoriques et applications pratiques Trad. de Daniel Santano y Leon. Madrir, Paraninfo, 1974, 243 pp. ol.

DEBOO G. J. BURROUS, C. N. Integrated circuits and semiconductor devices: theory and aplications. New York, Mc Graw-Hill, 1971, 655pp.

SINGH, J., Semiconductor optoelectronics: Physics and Technology, New York, McGraw-Hill, Inc., 1995.

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Introdução

A partir do descobrimento das propriedades eletrônicas da junção semicondutora *pn* e da fabricação de diodos e outros componentes, muitos estudos têm sido realizados com os materiais semicondutores, em busca de fenômenos que possibilitassem a construção de novos dispositivos. Um destes fenômenos se refere ao efeito de **ruptura** de uma junção semicondutora inversamente polarizada, que é utilizado na fabricação de diodos que funcionam como reguladores de tensão em circuitos eletrônicos. O diodo semicondutor que opera utilizando esse efeito é denominado de **diodo Zener**.

Este fascículo tratará das características principais do diodo Zener, fornecendo informações indispensáveis para que o leitor adquira o conhecimento necessário à utilização daquele componente em aplicações de eletrônica como, por exemplo, na obtenção de regulagem de tensão em fontes de alimentação.

Para a boa compreensão do conteúdo e desenvolvimento das atividades contidas neste fascículo, o leitor deverá estar familiarizado com os conceitos relativos a:

- Diodo semicondutor.
- Curvas características do diodo semicondutor.

Diodo Zener

O diodo Zener é um tipo especial de diodo utilizado como regulador de tensão. A sua capacidade de regulação de tensão é empregada principalmente nas fontes de alimentação, para obtenção de uma tensão de saída praticamente constante.

A **Fig.1** mostra o símbolo geralmente utilizado para representação do diodo Zener nos diagramas de circuito.

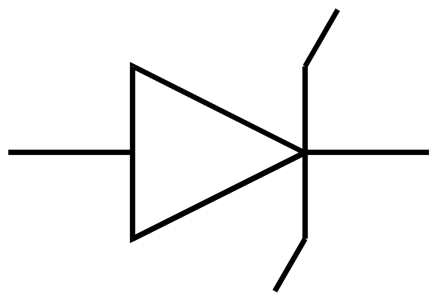


Fig.1 Símbolo de representação do diodo Zener.

COMPORTAMENTO DO DIODO ZENER

O comportamento do diodo Zener depende fundamentalmente da forma como é polarizado, conforme discutido a seguir.

POLARIZAÇÃO DIRETA

Quando polarizado diretamente, o diodo Zener se comporta como um diodo convencional; ou seja, operando no regime de condução com uma queda de tensão típica através de seus terminais.

A **Fig.2** mostra um circuito utilizado para polarizar diretamente um diodo Zener de silício, juntamente com a porção da curva característica representativa da região de condução do diodo.

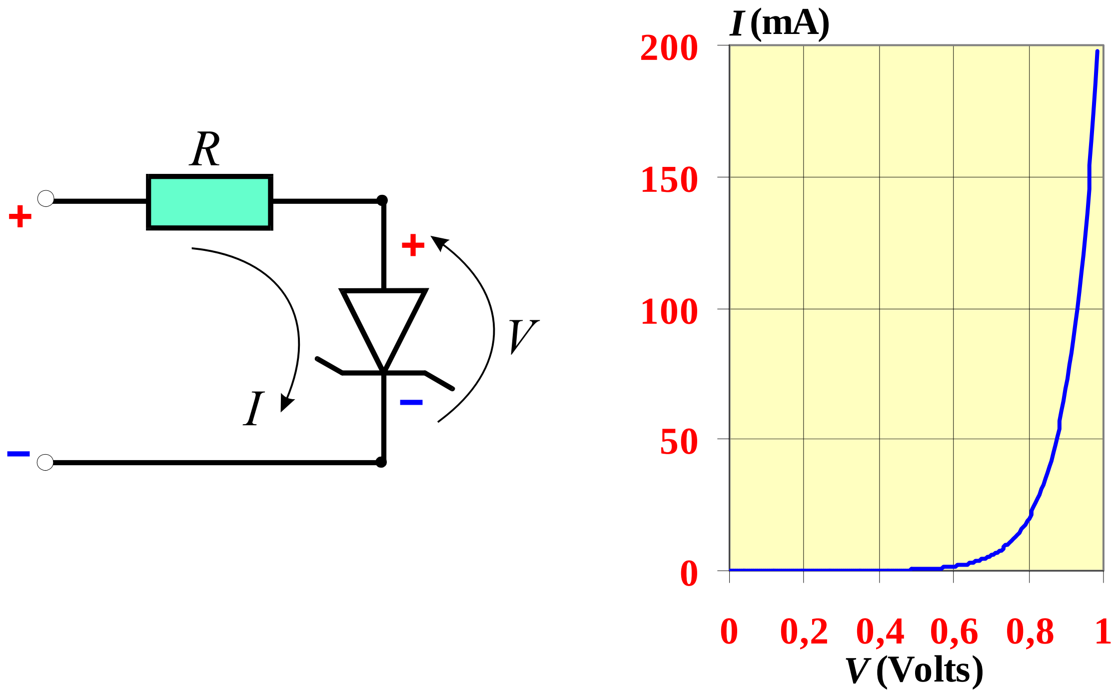


Fig.2 Diodo Zener polarizado diretamente e curva característica correspondente.

Normalmente o diodo Zener não é utilizado com polarização direta nos circuitos eletrônicos.

POLARIZAÇÃO INVERSA

Até um determinado valor da tensão inversamente aplicada, o diodo Zener comporta-se como um diodo comum, ou seja, operando no regime de bloqueio. Neste regime, circula através do diodo uma pequena corrente de fuga, conforme ilustrado no gráfico da **Fig.3**.

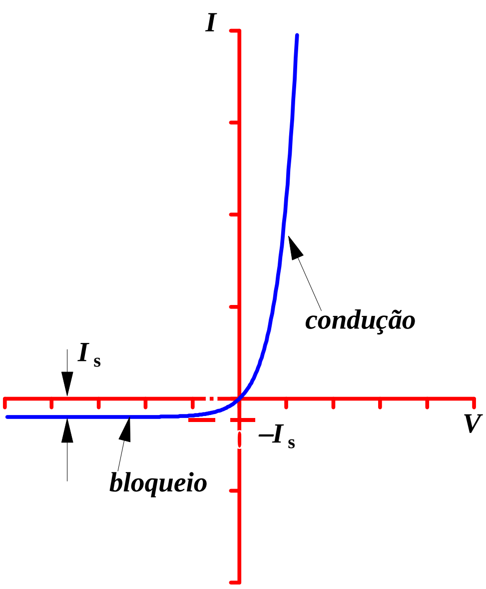


Fig.3 Regiões de condução e bloqueio na curva característica do diodo Zener.

Na **Fig.3**, o sinal negativo associado à corrente de fuga ou de saturação ($-I_s$) indica que, no regime de bloqueio, a corrente flui no sentido inverso através do diodo.

A partir de um determinado valor da tensão inversa aplicada ao diodo, ocorre o efeito de **ruptura**, que faz com que o diodo entre subitamente em condução, mesmo estando submetido a uma polarização inversa, conforme ilustrado na **Fig.4**. A partir dessa condição, a corrente inversa aumenta rapidamente e a queda de tensão através do diodo se mantém praticamente constante.

O valor V_Z da tensão inversa a partir da qual o diodo Zener entra no regime de condução é denominado de **tensão Zener**.

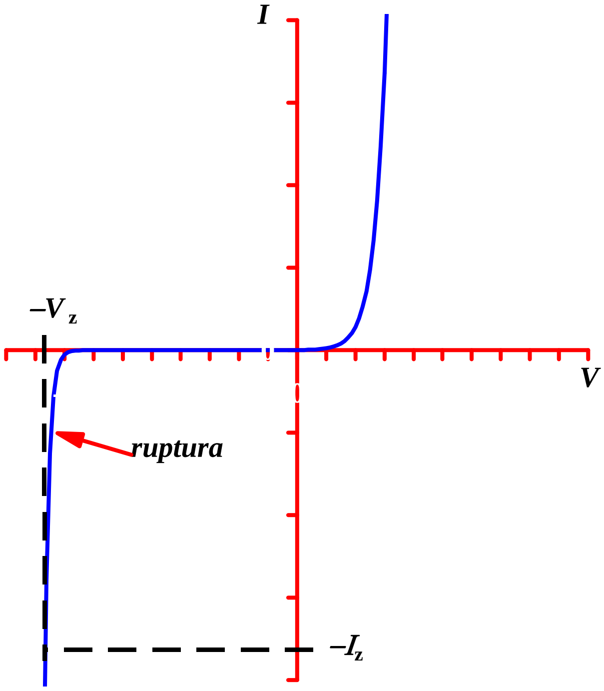


Fig.4 Efeito de ruptura em um diodo Zener.

O valor V_z da tensão inversa que coloca o diodo Zener em regime de condução é denominado de tensão Zener.

Enquanto houver corrente inversa fluindo através do diodo Zener, a tensão entre os seus terminais mantém-se praticamente fixada no valor V_Z.

O funcionamento típico do diodo Zener é com corrente inversa, o que estabelece uma tensão constante entre os seus terminais.

É importante observar que quando polarizado inversamente, qualquer junção semicondutora pode sofrer o efeito de ruptura. A diferença fundamental entre um diodo Zener e aquele aqui denominado de diodo comum ou convencional, reside no fato de o diodo Zener ser fabricado com materiais semicondutores condicionados a resistir ao valor intenso da corrente inversa presente no regime de ruptura, ao passo que um diodo convencional seria danificado permanentemente se submetido às mesmas condições de operação.

CARACTERÍSTICAS DO DIODO ZENER

São os seguintes os parâmetros utilizados na caracterização do diodo Zener:

- Tensão Zener.
- Potência máxima de dissipação.
- Coeficiente de temperatura.
- Tolerância.

TENSÃO ZENER

O valor da tensão Zener, ou tensão de ruptura de um diodo é controlada durante o processo de fabricação e depende da resistividade da junção semicondutora. A escolha adequada das dimensões, tipo de material e grau de dopagem, possibilitam a operação normal do diodo mesmo quando submetido a alto valor de corrente inversa.

Os diodos Zener são fabricados com valores do parâmetro V_z que variam de 2 V até algumas dezenas de volts. O valor da tensão Zener é fornecido pelo fabricante nos folhetos técnicos do componente.

POTÊNCIA MÁXIMA DE DISSIPAÇÃO

O diodo Zener operando com uma tensão fixa V_Z na região de ruptura, é percorrido por uma alta corrente inversa, dissipando, portanto, potência na forma de calor. A potência dissipada P_Z pode ser obtida do produto

$$P_Z = V_Z I_Z \qquad (1)$$

onde I_Z é a corrente inversa de operação definida na **Fig.4**.

Cada diodo Zener pode operar até um valor máximo da potência de dissipação, valor este que assegura a operação normal do componente. Esse limite de potência é fornecido pelo fabricante no folheto de especificações do diodo.

Utilizando as especificações do parâmetro V_z e da potência máxima de dissipação $P_{z,máx}$, a corrente inversa máxima de operação do diodo $I_{z,máx}$, pode ser calculada com o auxílio da **Eq.(1)**, resultando em

$$I_{z,máx} = \frac{P_{z,máx}}{V_z} \quad (2)$$

O valor da corrente, calculado através da **Eq.(2)**, não pode ser excedido sob pena de danificação do diodo Zener por excesso de aquecimento.

Diodos Zener com potência máxima de dissipação de cerca de 1 Watt podem ser encontrados com encapsulamentos de vidro ou plástico. Para operação a níveis mais altos de potência, o componente é geralmente fabricado com um encapsulamento metálico, do tipo mostrado na **Fig.5** para facilitar a retirada de calor do material semicondutor, minimizando, assim, o aquecimento.

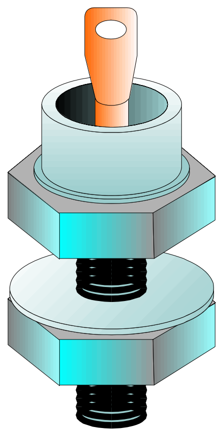


Fig.5 Encapsulamento de um diodo Zener de alta potência.

A faixa de valores de corrente de operação do diodo Zener ilustrada na **Fig.6**, é determinada por dois valores limite, assim definidos:

- $I_{z,máx}$ = valor máximo da corrente de operação.
- $I_{z,mín}$ = valor mínimo da corrente de operação.

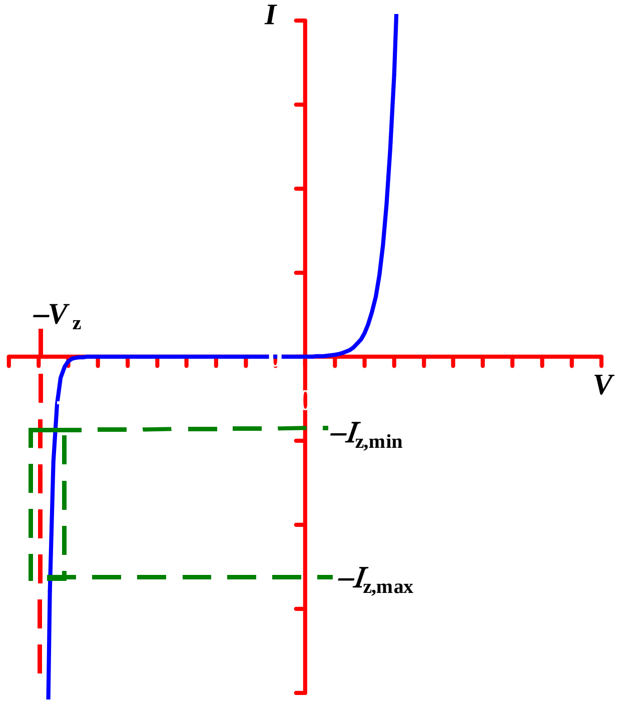


Fig.6 Limites de operação do diodo Zener na curva característica.

O valor máximo é calculado com o uso da **Eq.(2)**, e o valor mínimo é definido como 10% do valor máximo; ou seja,

$$I_{z,\text{mín}} = \frac{I_{z,\text{máx}}}{10} \qquad (3)$$

COEFICIENTE DE TEMPERATURA

Os diodos Zener são fabricados com materiais semicondutores, que sofrem influência da temperatura. Esta influência se traduz em variações no valor da tensão Zener, a partir de variações na temperatura de operação.

Esse efeito é pré-especificado pelo fabricante, sendo caracterizado na forma de um **coeficiente de temperatura** que permite determinar de quantos milivolts varia o valor V_z para cada grau centígrado de variação da temperatura.

Devido a uma diferença existente entre os dois mecanismos responsáveis pela produção da corrente de ruptura em um diodo Zener, o coeficiente de temperatura pode ser positivo ou negativo. Essa diferença permite classificar dois grupos distintos de componente conforme discriminado na **Tabela 1**.

Tabela 1 Divisão de componentes em dois grupos de acordo com o sinal do coeficiente de temperatura.

Tensão Zener	Coeficiente de temperatura (mV/°C)	Observação
$V_z \leq 6V$	Negativo	A tensão Zener diminui com o aumento da temperatura
$V_z > 6V$	Positivo	A tensão Zener aumenta com o aumento da temperatura.

A curva característica da **Fig.7** ilustra a dependência térmica da tensão Zener para um componente com coeficiente de temperatura positivo.

Os valores da tensão Zener constantes nos folhetos técnicos são definidos para uma temperatura de operação de 25ºC.

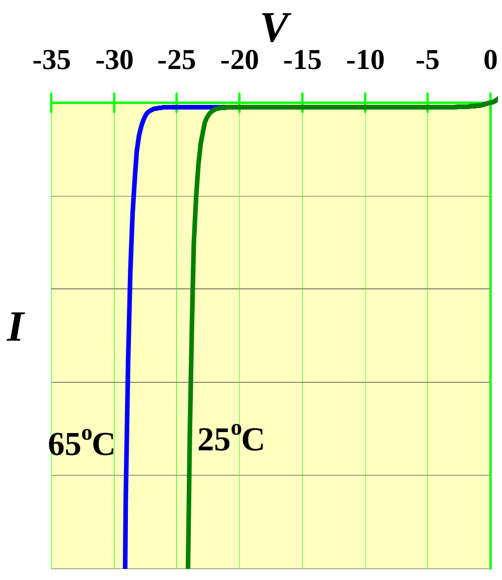


Fig.7 Variação da curva característica de um diodo Zener com coeficiente de temperatura positivo.

TOLERÂNCIA

A tolerância do componente especifica a variação que pode existir entre o **valor especificado** e o valor real da tensão inversa de operação do diodo Zener. Isso significa que um diodo Zener de 12 V pode ter uma tensão inversa real, por exemplo, de 11,5 V.

A tolerância juntamente com os parâmetros de operação são especificados pelos fabricantes por um código de identificação do componente, conforme descrito na **Tabela 2**.

Tabela 2 Formas de especificação da tolerância de diodos Zener a partir dos códigos de identificação.

Tolerância	Especificação da tolerância	Exemplo
5%	O último elemento do código de identificação é a letra *A*	**Cód. de ident.: 1N4742 A** Caracteriza um diodo Zener de 12V, 1W, com tolerância de 5%
10%	O último elemento do código de identificação é um numeral	**Cód. de ident.: 1N4733** Caracteriza um diodo Zener de 5,1V, 1W, com tolerância de 10%

A tolerância de 5% do componente 1N4742A especificado na **Tabela 2,** indica que a tensão Zener pode variar no intervalo 11,4 V $\leq V_z \leq$ 12,6 V. Já o componente 1N4733, de 10% de tolerância, teria uma tensão Zener situada no intervalo 4,6 V $\leq V_z \leq$ 5,6 V.

DIODO ZENER IDEAL VERSUS REAL

O diodo Zener ideal é definido como aquele que, operando no regime de ruptura, mantém a tensão absolutamente constante independente da corrente inversa fluindo através de seus terminais.

A **Fig.8** mostra a região de ruptura da curva característica de um diodo Zener considerado ideal. Como pode ser aí observado, tal dispositivo seria capaz de manter a tensão fixada em um valor constante V_z para valores distintos da corrente inversa através do diodo.

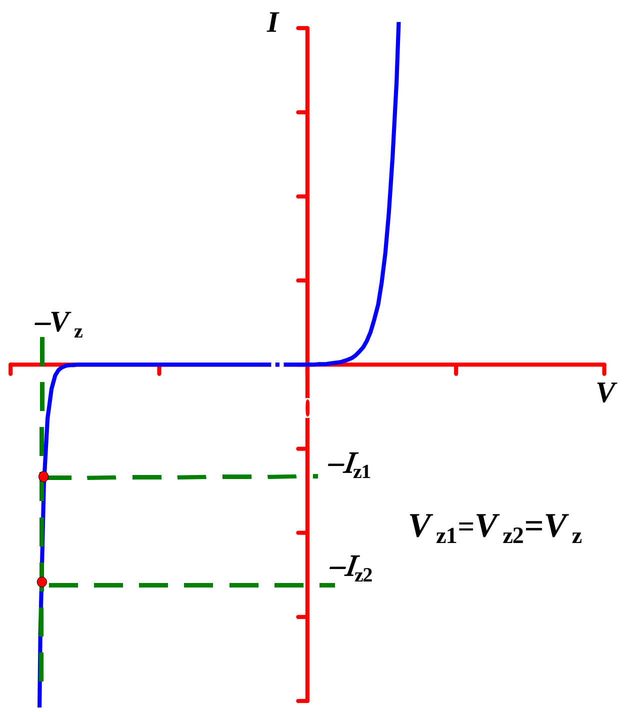


Fig.8 Região de ruptura na curva característica de um diodo Zener ideal.

A região de ruptura de um diodo Zener real é caracterizada por uma pequena variação da tensão Zener quando a corrente inversa é alterada, conforme ilustra o gráfico da **Fig.9**. Porém, considerando que a variação em V_z seja muito pequena, o diodo Zener pode ser considerado ideal na maioria das aplicações de interesse prático.

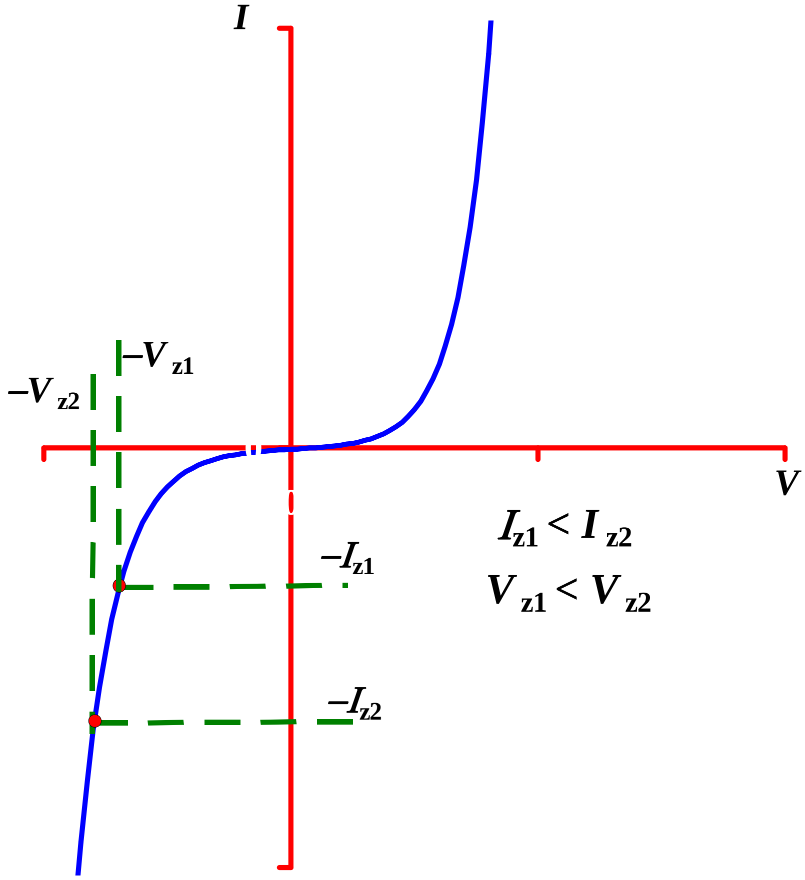


Fig.9 Região de ruptura na curva característica de um diodo Zener real.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Qual a forma adequada de polarização de um diodo Zener e qual a sua principal aplicação em eletrônica?

2. Descreva o fenômeno que ocorre a partir da aplicação de uma tensão inversa em um diodo Zener.

3. Que parâmetros são utilizados na caracterização de um diodo Zener?

4. O que é coeficiente de temperatura de um diodo Zener?

BIBLIOGRAFIA

CIPELLI, Anto Marco Vicare & SANDRINI, Waldir João. Teoria e desenvolvimento de projetos de circuito eletrônicos. 7.ª ed., São Paulo, Erica, 1983, 580pp.

SENAI/DN. Reparador de circuitos eletrônicos; Eletrônica básica II. Rio de Janeiro, Divisão de Ensino e Treinamento, c1979 (Coleção Básica Senai, Módulo 1).

TUCCI, Wilson José. Introdução à eletrônica. 7.ª ed., São Paulo, Nobel 1983, 349pp.

MILLMAN, Jacob & HALKIAS, Christos C., Integrated Electronics: Analog and Digital Circuits and Systems, pp. 73-77 (McGraw-Hill, Inc., International Student Edition, 1972).

SINGH, J., Semiconductor Optoelectronics: Physics and Technology, New York, McGraw-Hill, Inc., 1995.

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Introdução

A maior aplicação do diodo Zener reside na regulação de tensão de saída de fontes de alimentação. Através da utilização do diodo Zener, em conjunto com um resistor, pode-se conseguir que uma fonte de alimentação forneça tensão praticamente constante à carga.

Este fascículo faz uma descrição do princípio de funcionamento de um circuito regulador de tensão com diodo Zener, fornecendo informações indispensáveis para que o leitor adquira o conhecimento necessário à montagem, reparo e teste de fontes de *cc* reguladas.

Para a boa compreensão do conteúdo e desenvolvimento das atividades contidas neste fascículo, o leitor deverá estar familiarizado com os conceitos relativos a:

- Diodo Zener.

O diodo Zener como regulador de tensão

O comportamento do diodo Zener na região de ruptura permite a montagem de circuitos reguladores de tensão, a partir de fontes que forneçam tensões onduladas, incluindo situações em que a carga apresente um consumo variável. Um diagrama representativo de um circuito regulador de tensão a diodo Zener na saída de uma fonte de alimentação é ilustrado na **Fig.1.**

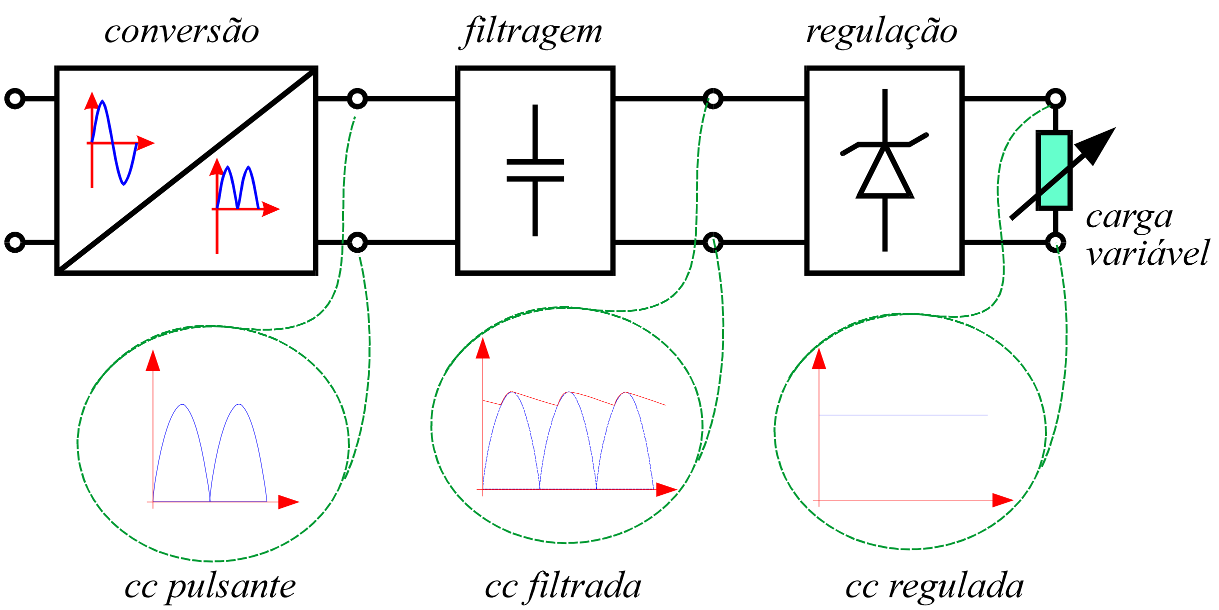


Fig.1 Diagrama de blocos e formas de onda associadas aos três estágios de uma fonte de alimentação regulada a diodo Zener.

Para que o diodo Zener opere adequadamente como regulador de tensão é necessário introduzir um resistor que limite a corrente inversa através do diodo a um nível inferior ao valor máximo especificado pelo fabricante, conforme indicado na **Fig.2**. Como pode ser aí observado, o diodo deve ser conectado em paralelo com a carga, que fica assim submetida à mesma tensão existente entre os terminais do Zener.

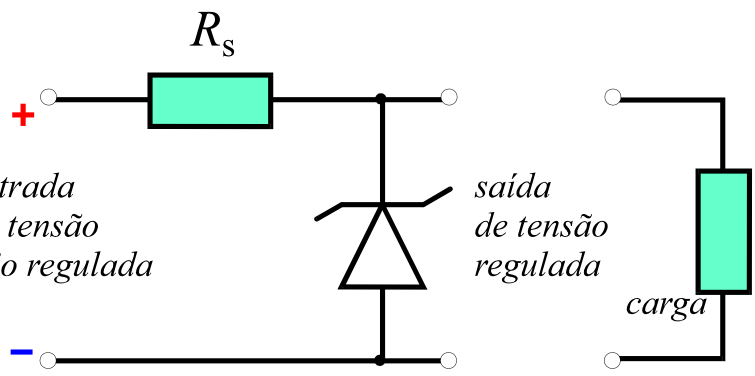


Fig.2 Diagrama de um circuito regulador a diodo Zener, com um resistor limitador de corrente.

FUNCIONAMENTO DO CIRCUITO REGULADOR

O circuito regulador com diodo Zener deve ser alimentado na entrada com uma tensão pelo menos 40% superior ao valor da tensão Zener, para que possa efetuar adequadamente a regulação. Por exemplo, se a tensão regulada for especificada com um valor de 6V o circuito regulador deve utilizar um diodo Zener com V_Z = 6V e ser alimentado com uma tensão de entrada de pelo menos 8,5V, como mostra a **Fig.3**.

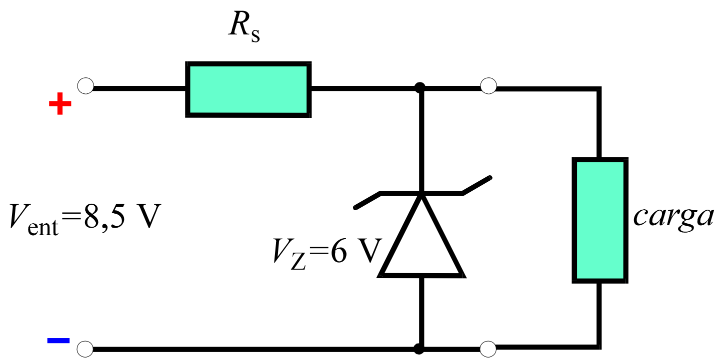


Fig.3 Um possível diagrama de circuito para obtenção de uma saída regulada de 6V.

Com base no diagrama de circuito mostrado na **Fig.4**, a corrente através do resistor limitador é dada pela soma

$$I_s = I_z + I_R \qquad (1)$$

onde:

- I_s = corrente através do resistor R_s;
- I_z = corrente inversa no diodo Zener;
- I_R = corrente de carga.

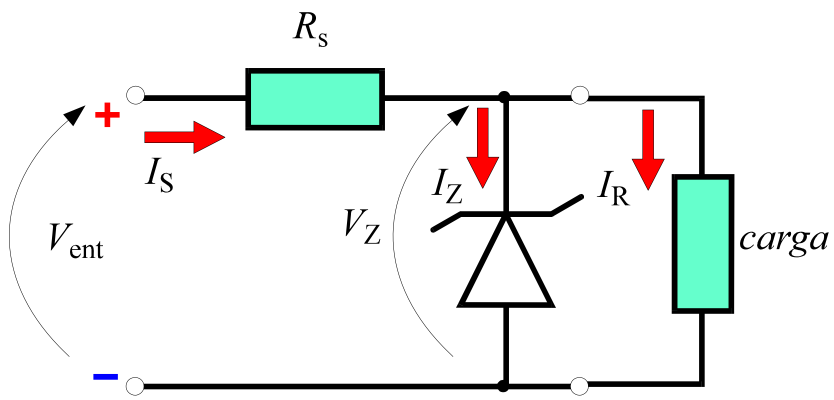


Fig.4 Correntes através dos elementos do circuito da **Fig.3**.

Com o diodo Zener operando na região de ruptura, a corrente através do resistor limitador é tal que a queda de tensão se torna

$$V_s = V_{ent} - V_z \qquad (2)$$

onde:

- V_s = queda de tensão no resistor limitador.
- V_{ent} = tensão de entrada.

Existem três possibilidades de variação nas condições de operação da fonte regulada:

- Variações no nível de tensão de entrada.
- Variações na corrente de carga.
- Variações no nível de tensão de entrada e na corrente de carga.

A operação do circuito regulador mediante essas condições é analisada a seguir.

VARIAÇÕES NO NÍVEL DE TENSÃO DE ENTRADA

Esta situação é muito comum em circuitos eletrônicos alimentados pela rede elétrica *ca*, como resultado da ondulação na tensão *cc* obtida a partir do processo de retificação com ou sem filtro capacitivo de saída. O comportamento do circuito regulador operando sob estas condições é discutido a seguir.

Acréscimo no nível de tensão de entrada

Quando ocorre um acréscimo no nível da tensão de entrada, esse aumento normalmente tenderia a ser transferido diretamente para a carga. Entretanto, o diodo Zener estando em paralelo com a carga mantém a tensão de saída constante.

A **Fig.5a** mostra o circuito regulador submetido a um acréscimo na tensão de entrada que varia de um valor $V_{ent}(t_1)$ até um valor $V_{ent}(t_2)$ entre os instantes de tempo t_1 e t_2, de acordo com o gráfico da **Fig.5b**. A este aumento de tensão deve corresponder um aumento de corrente no circuito.

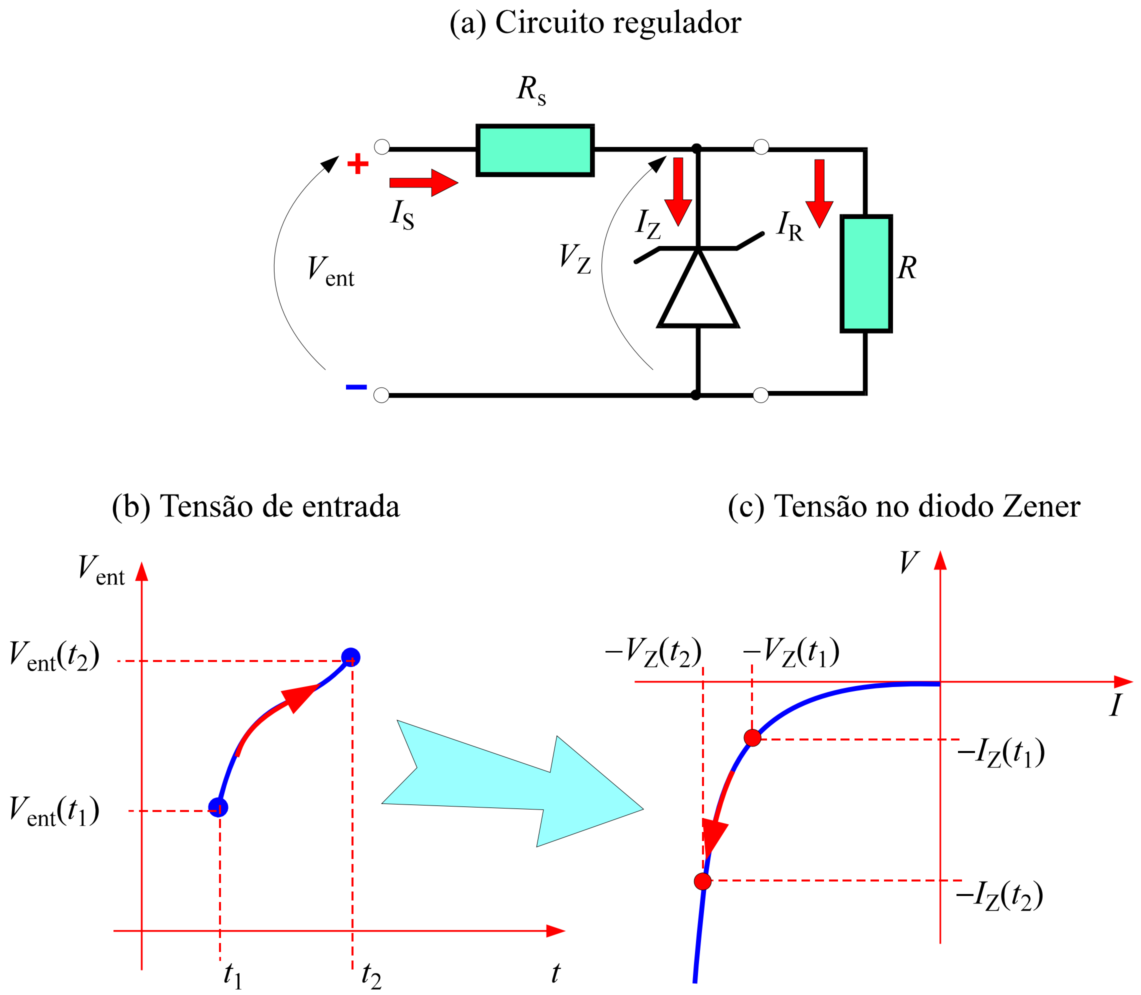


Fig.5 (a) Circuito regulador a diodo Zener, com o gráfico ilustrativo do aumento na tensão de entrada em **(b)** e o aumento correspondente na corrente através do diodo em **(c)**.

O aumento de corrente no circuito ocorre exclusivamente através do diodo Zener, conforme se pode verificar a partir da curva característica mostrada na **Fig.5c**. Como pode ser aí observado, a corrente através do diodo que no instante

t_1 valia $I_z(t_1)$, aumenta para um valor $I_z(t_2)$. Isso faz que a tensão através do diodo aumente do valor $V_z(t_1)$ para o valor $V_z(t_2)$. No entanto, como a região de ruptura na curva característica é praticamente vertical, a variação na tensão Zener é muito pequena, fazendo que a tensão na carga permaneça praticamente constante.

Pela **Eq.(1)**, um aumento no valor da corrente I_z provoca um aumento na corrente I_s através do resistor limitador. Esse aumento de corrente provoca um aumento na queda de tensão V_s através do resistor. Como a tensão Zener se mantém praticamente constante, conclui-se que o aumento no valor da tensão de entrada é totalmente aplicado entre os terminais do resistor limitador.

Decréscimo no nível de tensão de entrada

A **Fig.6a** mostra o gráfico da tensão de entrada quando esta diminui de um valor $V_{ent}(t_1)$ até um valor $V_{ent}(t_2)$. Nessa situação a corrente no circuito tende a diminuir.

De acordo com o que foi discutido anteriormente, essa variação de corrente ocorre exclusivamente através do diodo Zener, conforme se pode verificar a partir de um exame da curva característica mostrada na **Fig.6b**. A queda de tensão através do diodo, e por conseqüência através da carga, sofre um decréscimo praticamente desprezível devido à característica vertical da curva da **Fig.6b** na região de ruptura.

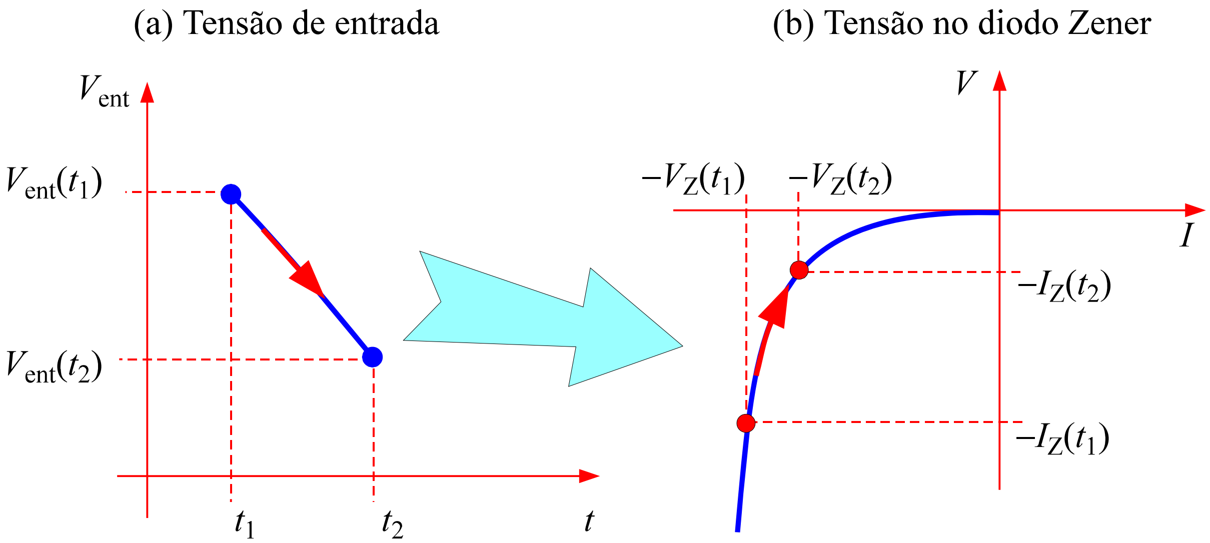


Fig.6 **(a)** Gráfico ilustrativo do decréscimo da tensão de entrada provocando um decréscimo correspondente na corrente através do diodo Zener em **(b)**.

Como a tensão Zener se mantém praticamente constante, conclui-se que o decréscimo no nível da tensão de entrada é totalmente aplicado entre os terminais do resistor limitador.

A partir dessa análise pode-se extrair a seguinte conclusão, ilustrada diagramaticamente na **Fig.7**:

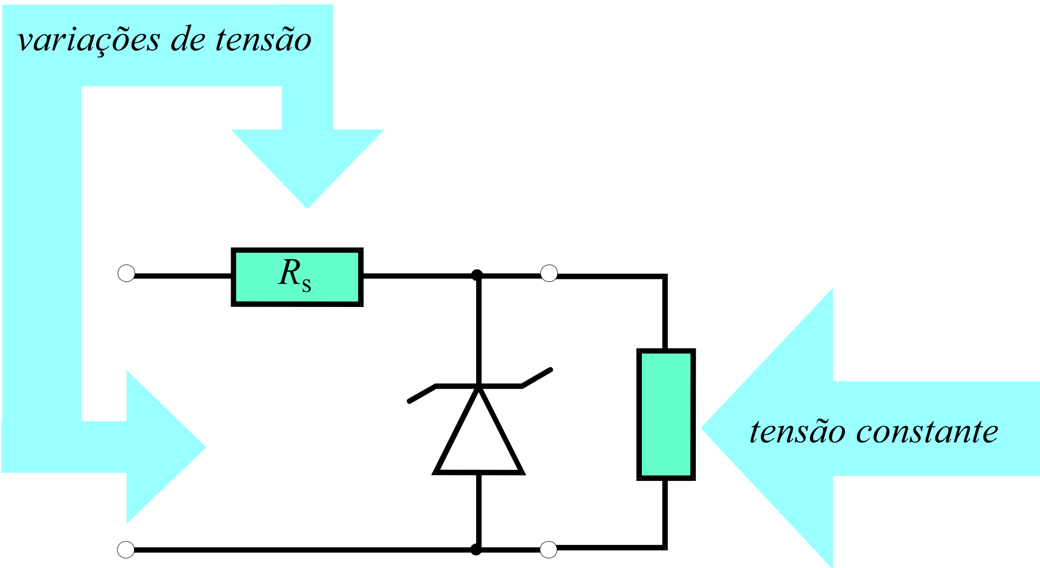


Fig.7 Comportamento do circuito regulador mediante variações no nível de tensão de entrada.

Qualquer variação no nível da tensão de entrada é diretamente transferida para o resistor limitador. A variação de corrente no resistor limitador ocorre exclusivamente devido à variação de corrente através do diodo Zener, que dessa forma mantém a tensão e a corrente na carga constantes.

VARIAÇÃO NA CORRENTE DE CARGA

Devido à característica não ideal dos filtros capacitivos, a tensão de ondulação na saída de uma fonte retificadora é influenciada pelo valor da corrente consumida pela carga.

O diodo Zener, quando utilizado em um circuito regulador, possibilita que a tensão de saída permaneça praticamente invariável independentemente do consumo de corrente pela carga.

Para o circuito representado na **Fig.8**, admitindo-se que a tensão de entrada seja constante e que o diodo Zener esteja operando na região de ruptura, a **Eq.(2)** indica que a queda de tensão sobre o resistor limitador é constante.

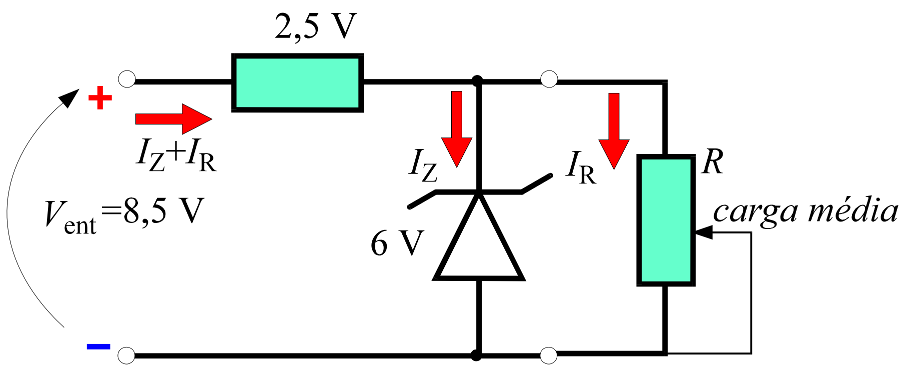


Fig.8 Circuito regulado a diodo Zener.

A corrente através do resistor limitador pode ser obtida da expressão

$$I_s = \frac{V_{ent} - V_z}{R_s} \quad (3)$$

com o numerador da **Eq.(3)** representando a queda de tensão no resistor R_s. Dessa forma, a corrente I_s permanece constante.

Da **Eq.(1)**, reproduzida a seguir,

$$I_s = I_z + I_R \quad (1)$$

nota-se que, como a soma das correntes no segundo membro é constante, então:

$$I_R \uparrow \quad \Rightarrow \quad I_z \downarrow$$

$$I_R \downarrow \quad \Rightarrow \quad I_z \uparrow$$

A partir das relações representadas no diagrama anterior pode-se extrair a seguinte conclusão:

Para uma tensão de entrada constante, qualquer variação na corrente através da carga é compensada por uma variação oposta na corrente através do diodo Zener, de forma a manter a tensão na carga praticamente constante.

VARIAÇÕES NO NÍVEL DE TENSÃO DE ENTRADA E NA CORRENTE DE CARGA

Na maioria dos casos os circuitos reguladores estão sujeitos a variações simultâneas de tensão de entrada e de corrente de carga. Essas variações se traduzem como variações de tensão e corrente nos elementos do circuito regulador, que obedecem aos dois princípios seguintes:

- Variações na tensão de entrada são transferidas diretamente para o resistor limitador.

- Variações na corrente de carga são compensadas por variações opostas de corrente no diodo Zener.

Esses dois princípios estão representados diagramaticamente na **Fig.9**.

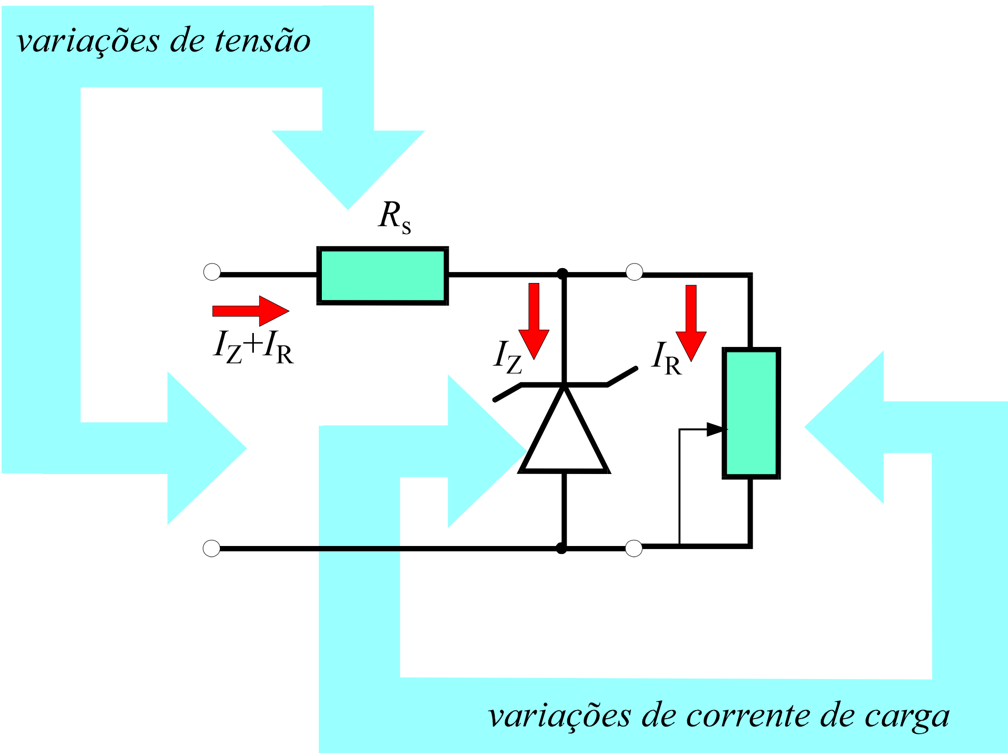


Fig.9 Comportamento de um circuito regulado a diodo Zener mediante variações nas condições de operação.

FONTE DE ALIMENTAÇÃO COM TENSÃO DE SAÍDA REGULADA A DIODO ZENER

Uma fonte de alimentação com tensão de saída regulada a diodo Zener se compõe basicamente dos três blocos representados na **Fig.10**.

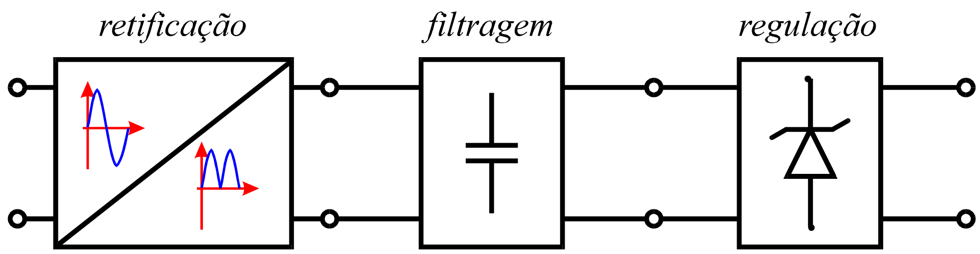


Fig.10 Diagrama de blocos representativo de uma fonte de alimentação regulada a diodo Zener.

Os blocos do diagrama da **Fig.10** realizam as seguintes funções:

- **Retificação:** A tensão *ca* da rede elétrica é transformada em *cc* pulsada.
- **Filtragem:** A tensão *cc* pulsada é filtrada, fornecendo uma saída ondulada próxima à tensão *cc* ideal.
- **Regulação:** A tensão *cc* ondulada é transformada em uma tensão *cc* praticamente constante, como mostrado na **Fig.11**.

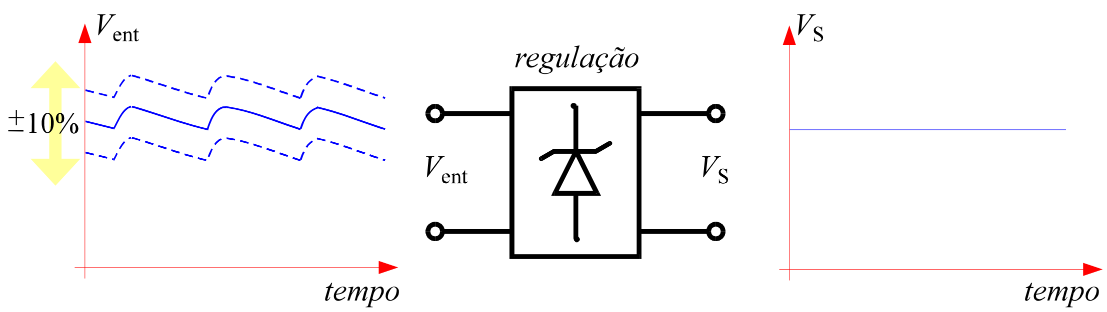


Fig.11 Efeito do bloco regulador sobre a forma de tensão ondulada existente na saída do filtro de um circuito retificador.

A **Fig.12** ilustra o aspecto de uma placa de circuito impresso configurada para implementação de uma fonte *cc* com tensão de saída regulada a diodo Zener, e os blocos correspondentes ao diagrama da **Fig.10**. O reparo ou teste de um circuito desse tipo pode ser realizado com base no fluxograma mostrado na **Fig.13**.

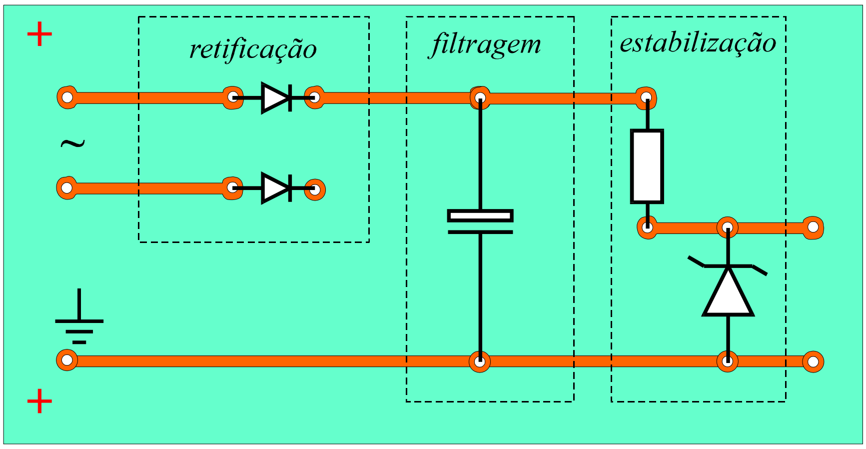


Fig.12 Placa de circuito impresso de uma fonte *cc* regulada a diodo Zener.

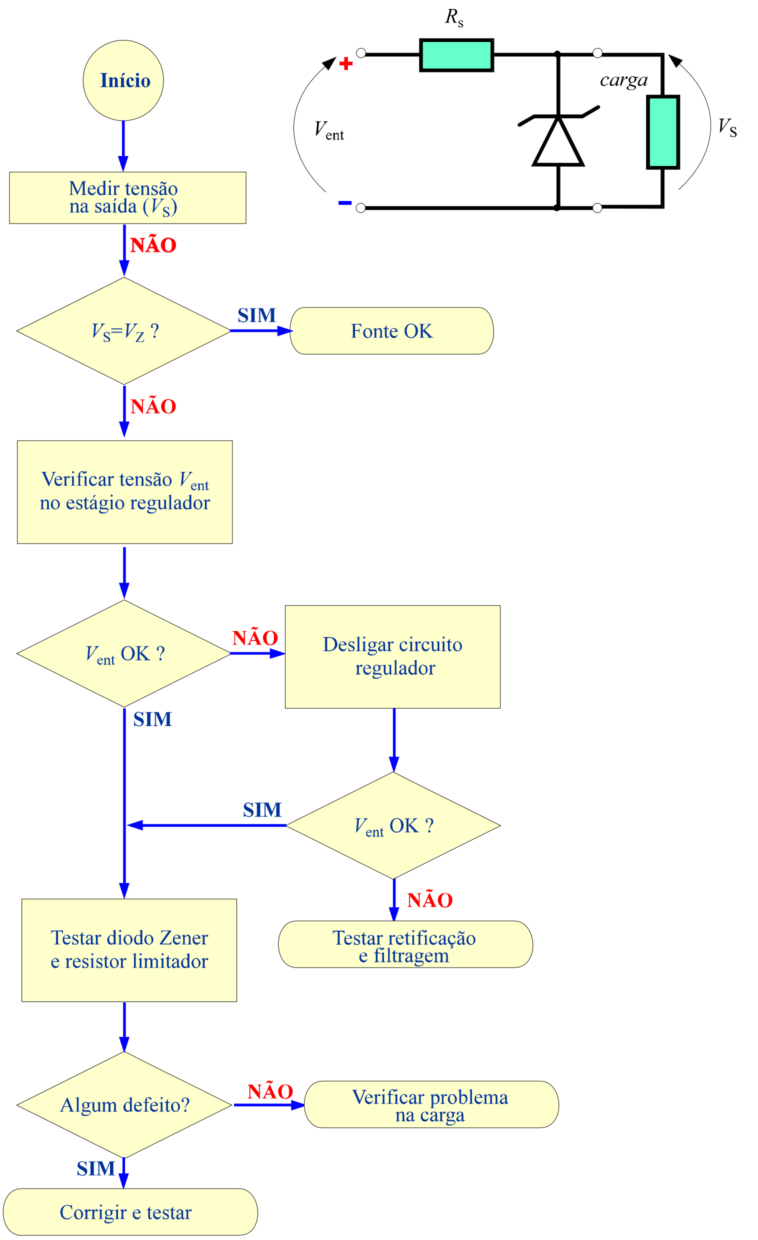


Fig.13 Fluxograma utilizado para o reparo ou teste de uma fonte *cc* regulada a diodo Zener.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Qual a principal utilização do diodo Zener?

2. Para que um regulador a diodo Zener opere adequadamente, quão maior deve ser a tensão de entrada com relação à tensão regulada?

3. Descreva os efeitos produzidos em um circuito regulador quando ocorre um aumento na tensão de entrada.

4. Repita a questão 3 no caso de ocorrer uma diminuição na tensão de entrada.

5. Como se comporta um regulador a Zener perante variações na corrente de carga?

BIBLIOGRAFIA

ARNOLD, Robert & BRANT, Arns. Transistores, segunda parte. São Paulo, EPU, 1975. il. (Eletrônica Industrial, 2).

CIPELLI, Antônio Marco Vicari & SANDRINI, Valdir João. Teoria do desenvolvimento de Projetos de Circuitos Eletrônicos . 7.ed. São Paulo, Érica, 1983. 580p.

DEGEM SYSTEMS. Circuitos transistorizados formadores de pulso. Israel, Eletrônica modular, 1976 . 255p. il.

FIGINI, Gianfranco. Eletrônica industrial; circuitos e aplicações. São Paulo, Hemus, c 1982. 336p.

SENAI/ Departamento Nacional. Reparador de circuitos eletrônicos; eletrônica básica II. Rio de Janeiro, Divisão de Ensino e Treinamento, c 1979. (Coleção Básica Senai, Módulo 1).

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Introdução

O transistor é um componente fabricado com cristais semicondutores cuja descoberta revolucionou a eletrônica. Sua descoberta valeu o prêmio Nobel a três cientistas da Bell Labs dos EUA.

Sem dúvida, nem mesmo os descobridores deste componente poderiam imaginar que com a descoberta, se iniciava uma nova era no desenvolvimento da humanidade.

Este fascículo é, também para o leitor, um marco no estudo da eletrônica. Nele se inicia o estudo desse importante componente.

O objetivo do fascículo é apresentar a estrutura básica compondo o transistor e, com base nesse conhecimento, permitir ao leitor a realização de testes com o componente usando um multímetro.

Para a boa compreensão do conteúdo e desenvolvimento das atividades contidas neste fascículo, o leitor deverá estar familiarizado com os conceitos relativos a:

- Diodo semicondutor.

Estrutura básica

O transistor bipolar é um componente eletrônico constituído de cristais semicondutores, capaz de atuar como controlador de corrente, o que possibilita o seu uso como amplificador de sinais ou como chave eletrônica.

Em qualquer uma das duas funções o transistor encontra uma ampla gama de aplicações, como por exemplo:

Amplificador de sinais: Equipamentos de som e imagem e controle industrial.

Chave eletrônica: Controle industrial, calculadoras e computadores eletrônicos.

O transistor bipolar proporcionou um grande desenvolvimento da eletrônica, devido a sua versatilidade de aplicação, constituindo-se em elemento chave em grande parte dos equipamentos eletrônicos.

A estrutura básica do transistor se compõe de duas camadas de material semicondutor, de mesmo tipo de dopagem, entre as quais é inserida uma terceira camada bem mais fina, de material semicondutor com um tipo de dopagem distinto dos outros dois, formando uma configuração semelhante à de um "sanduíche", conforme ilustrado na **Fig.1**.

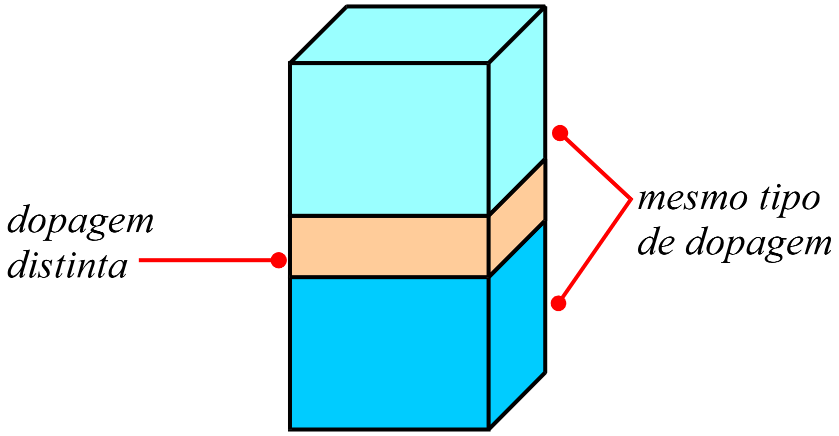


Fig.1 Estrutura básica de um transistor.

Como mostrado na **Fig.2**, a configuração da estrutura, em forma de sanduíche, permite que se obtenham dois tipos distintos de transistor:

- Um com as camadas externas de material tipo *p* e com a camada central formada de um material tipo *n*. Esse tipo de transistor é denominado de **transistor bipolar *pnp***.

- Outro com as camadas externas de material tipo *n* e com a camada central formada com um material tipo *p*. Esse tipo de transistor é denominado de **transistor bipolar *npn***.

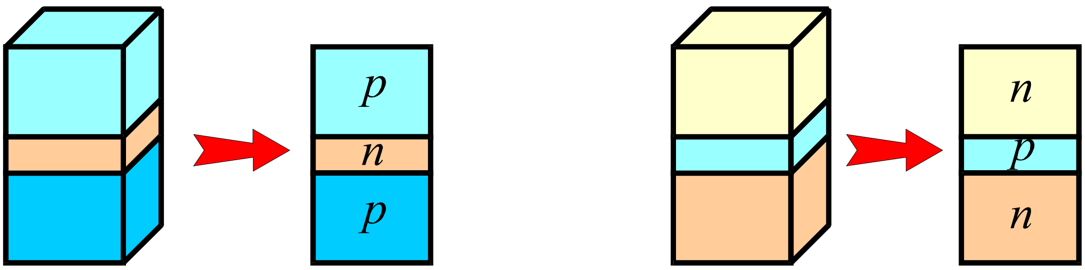


Fig.2 Estruturas dos transistores *pnp* e *npn*.

Os dois tipos de transistor podem cumprir as mesmas funções diferindo apenas na forma como as fontes de alimentação são conectadas aos terminais do componente.

O transistor bipolar pode se apresentar em duas configurações: pnp e npn.

TERMINAIS DO TRANSISTOR

Como mostrado na **Fig.3**, cada uma das camadas que formam o transistor é conectada a um terminal que permite a interligação da estrutura do componente aos circuitos eletrônicos.

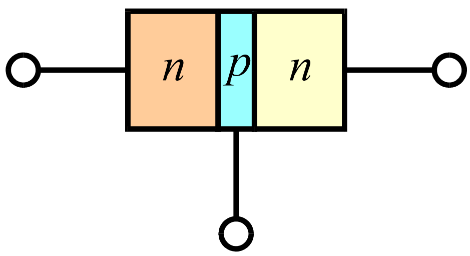


Fig.3 Estrutura básica de um transistor de três terminais.

Os terminais recebem uma designação que permite distinguir cada uma das camadas:

- A camada central é denominada de **base**, sendo representada pela letra *B*.
- Uma das camadas externas é denominada de **coletor**, sendo representada pela letra *C*.
- A outra camada externa é denominada de **emissor**, sendo representada pela letra *E*.

A **Fig.4** mostra os dois tipos de transistor, com a identificação dos terminais.

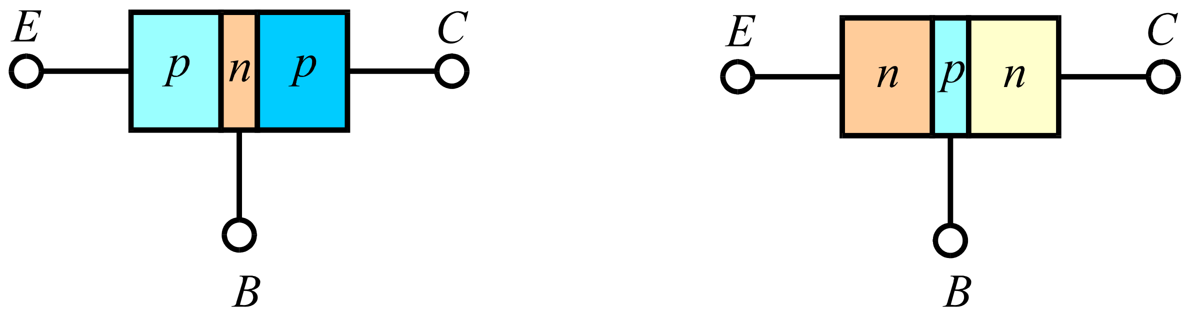


Fig.4 Transistores *pnp* e *npn* com a identificação dos terminais.

O transistor possui três terminais: coletor, base e emissor.

Embora as camadas referentes ao coletor e ao emissor de um transistor tenham o mesmo tipo de dopagem, elas diferem em dimensão geométrica e no grau de dopagem, realizando portanto funções distintas quando o componente é conectado a um circuito eletrônico.

SIMBOLOGIA

A **Fig.5** apresenta os símbolos utilizados na representação de circuito dos transistores *npn* e *pnp*. Como pode ser aí observado, os dois símbolos diferem apenas no sentido da seta entre os terminais da base e do emissor.

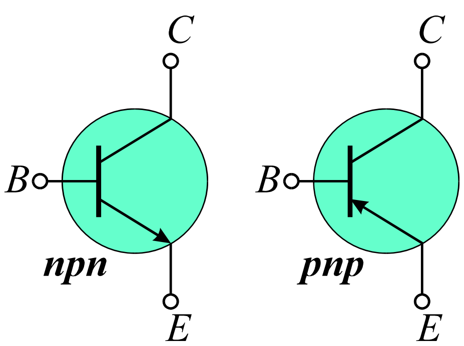


Fig.5 Representação de circuito dos transistores *npn* e *pnp*.

Alguns transistores são dotados de blindagem. Essa blindagem consiste de um encapsulamento metálico envolvendo a estrutura semicondutora, com o fim de evitar que o funcionamento do componente seja afetado por campos eletromagnéticos no ambiente. Esses transistores apresentam um quarto terminal, ligado à blindagem para que esta possa ser conectada ao terra do circuito eletrônico. A representação de circuito desses transistores está ilustrada na **Fig.6**.

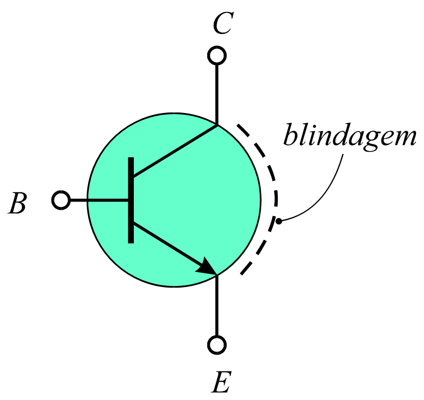


Fig.6 Representação de circuito de um transistor blindado.

ASPECTO REAL DOS TRANSISTORES

Os transistores podem se apresentar em diversos encapsulamentos, que variam em função do fabricante, do tipo de aplicação e da capacidade de dissipar calor. A **Fig.7** ilustra os aspectos de alguns encapsulamentos.

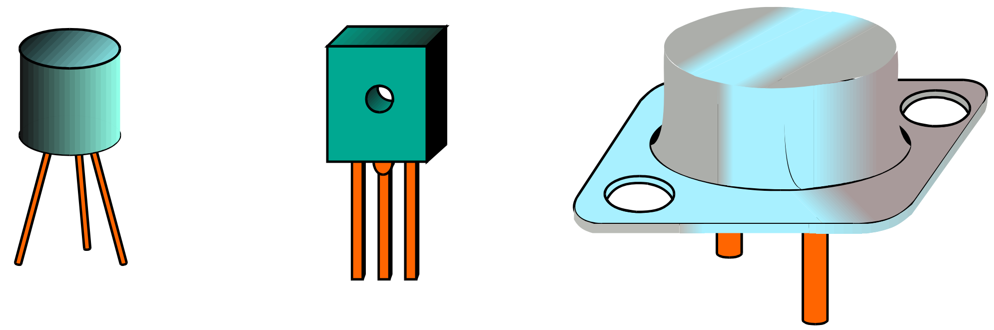


Fig.7 Encapsulamentos típicos de um transistor.

Devido à variedade de configurações, a identificação dos terminais de um transistor deve sempre ser feita com auxílio do folheto de especificações técnicas do componente.

Teste de transistores

Existem instrumentos sofisticados destinados especificamente ao teste das condições de operação de um transistor. No entanto, o uso de um multímetro também permite detectar possíveis defeitos no componente.

Como no teste de diodos com o uso de um multímetro, o teste de transistores pode não fornecer um resultado definitivo, e o uso do multímetro serve apenas para detectar os defeitos mais comuns nos transistores e diodos.

No caso do diodo, são os seguintes os defeitos de detecção imediata com o uso de um multímetro:

- Junção *pn* em curto.
- Junção *pn em aberto.*

Como descrito em fascículos anteriores, o teste de qualquer junção *pn* com o uso de um multímetro é feito em duas etapas:

Etapa 1: Realiza-se inicialmente a identificação da polaridade real das pontas de prova do multímetro.

Etapa 2: Após a identificação de polaridade, realiza-se o teste do diodo, que consiste em detectar a existência de baixa e alta resistências ao se intercambiarem os dois contatos entre as pontas de prova e os terminais da junção *pn*.

Conforme ilustrado na **Fig.8**, a estrutura de um transistor consiste em uma junção *pn* entre a base e o coletor e de uma segunda junção *pn* entre a base e o emissor.

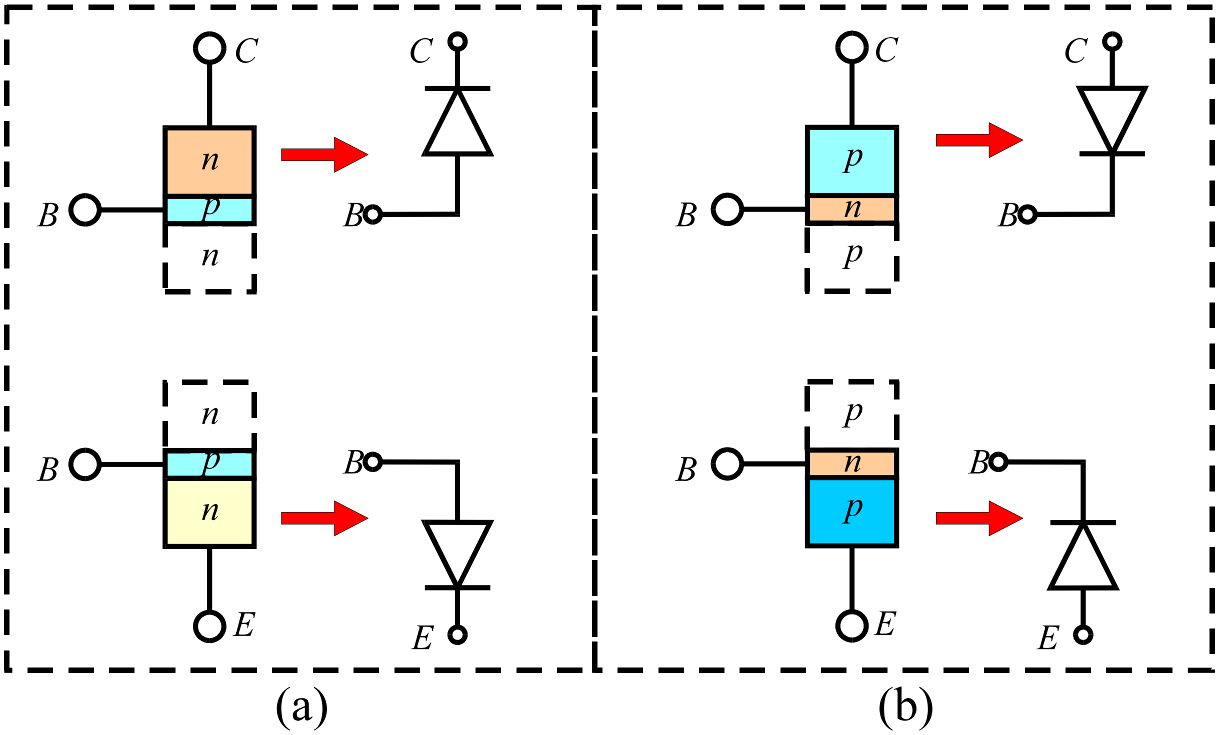


Fig.8 Junções *pn* do transistor *npn* em **(a)** e do transistor *pnp* em **(b)**.

Portanto, para a detecção de defeitos, o transistor pode ser considerado como composto de dois diodos conectados nas formas ilustradas na **Fig.9**.

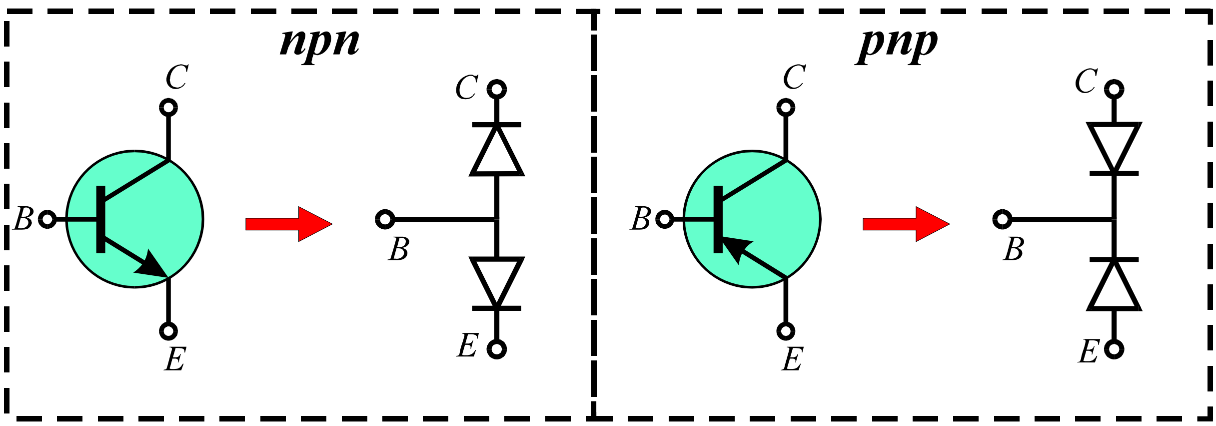


Fig.9 Representação de transistores *npn* e *pnp* por diodos equivalentes.

A detecção de defeitos no transistor consiste em verificar a existência de curto ou de circuito aberto entre os pares de terminais *BC*, *BE* e *CE*.

TESTE COM O USO DO MULTÍMETRO

O procedimento de teste das junções base-coletor e base-emissor é descrito a seguir tomando como exemplo o caso de um transistor *npn*.

DETECÇÃO DE DESCONTINUIDADES NAS JUNÇÕES

Com o potencial positivo da ponta de prova aplicado à base do transistor e o potencial negativo aplicado ao coletor ou ao emissor, como ilustrado na **Fig.10**, as junções correspondentes ficam polarizadas diretamente.

Na ausência de defeitos, o instrumento deverá indicar baixa resistência das junções *BC* e *BE*. Se houver uma junção em aberto, o instrumento fornecerá a indicação de uma resistência altíssima quando essa junção estiver sendo testada.

teste de abertura das junções

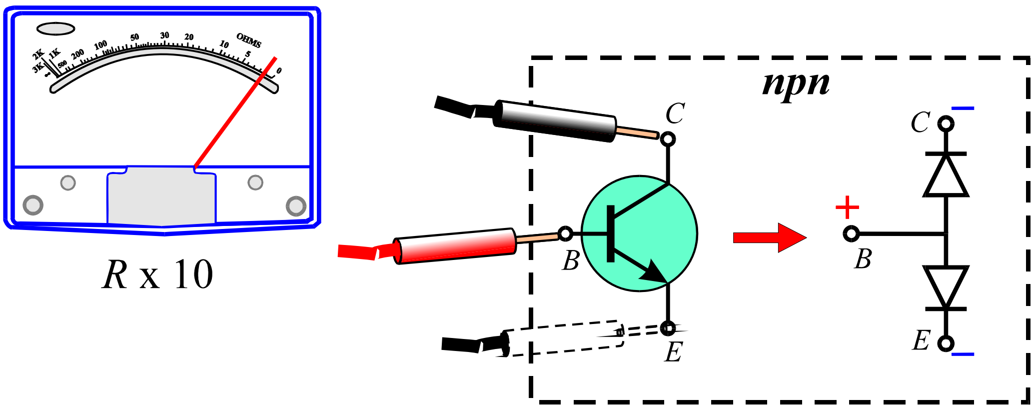


Fig.10 Detecção de descontinuidades nas junções *BC* e *BE* de um transistor *npn*.

DETECÇÃO DE CURTOS NAS JUNÇÕES

Para este teste as pontas de prova devem ser conectadas conforme mostrado na **Fig.11**.

Com a ponta de prova negativa conectada à base, a segunda ponta de prova polariza inversamente a junção *BC* ou *BE*. Na ausência de defeitos, o multímetro deverá fornecer a indicação de altas resistências nas junções. Se houver uma junção em curto o instrumento indicará uma baixa resistência naquela junção.

teste de curto circuito nas junções

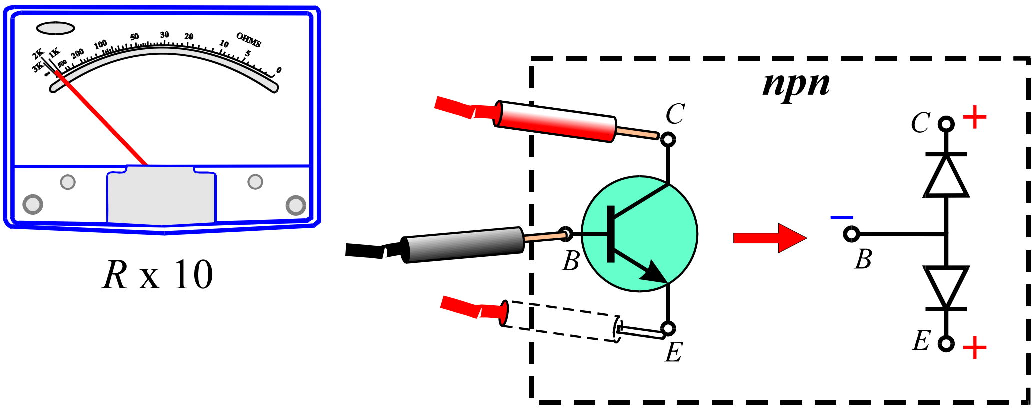


Fig.11 Teste para detecção de curtos nas junções *BC* e *BE* de um transistor *npn*.

DETECÇÃO DE CURTO-CIRCUITO ENTRE COLETOR E EMISSOR

Para completar os testes deve-se ainda verificar a condição elétrica entre os terminais do coletor e do emissor.

Com o terminal da base em aberto, o circuito equivalente entre os terminais *B* e *C* corresponde a dois diodos em série conectados inversamente. Dessa forma o multímetro deverá fornecer uma indicação de altíssima resistência para as duas possibilidades de conexão das pontas de prova mostradas na **Fig.12**.

teste coletor-emissor

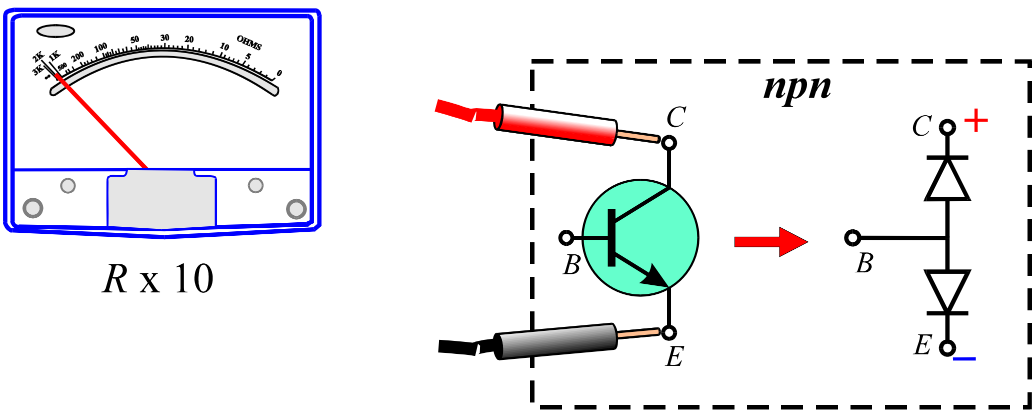


Fig.12 Teste para detecção de curto-circuito entre os terminais *C* e *E* de um transistor *npn*.

Para o caso de um transistor *pnp* os testes podem ser conduzidos seguindo o procedimento descrito anteriormente, exceto que as pontas de prova devem ser invertidas com relação às configurações ilustradas nas **Figs.10** a **12**.

Todos os testes devem ser realizados com o seletor do multímetro posicionado na escala R×10 ou R×100 e com o transistor desconectado de qualquer circuito externo.

Os testes realizados com multímetro não permitem detectar alterações nas características do transistor. Mesmo que o multímetro não detecte defeitos, existe ainda a possibilidade de que existam alterações nas características do transistor que o tornem impróprio para uso em circuitos.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Qual é a estrutura básica de um transistor bipolar?

2. Quais são as configurações de um transistor?

3. Desenhe os símbolos possíveis de um transistor e identifique os seus terminais.

4. Quais defeitos podem ser identificados em um transistor com o uso de um multímetro?

5. Descreva os procedimentos de execução dos testes identificados na questão anterior.

BIBLIOGRAFIA

ARNOLD, Robert & BRANT, Hans. Transistores, segunda parte. São Paulo, EPU, 1975. il. (Eletrônica Industrial, 2).

CIPELLI, Antônio Marco Vicari & SANDRINI, Valdir João. Teoria do desenvolvimento de Projetos de Circuitos Eletrônicos . 7.ed. São Paulo, Érica, 1983. 580p.

SENAI/ Departamento Nacional. Reparador de circuitos eletrônicos; eletrônica básica II. Rio de Janeiro, Divisão de Ensino e Treinamento, c 1979. (Coleção Básica Senai, Módulo 1).

TUCCI, Wilson José. Introdução à Eletrônica. 7.ed. São Paulo, Nobel, 1983. 349p.

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Introdução

O transistor desempenha um papel fundamental na eletrônica. A partir da sua descoberta o desenvolvimento da eletrônica tem se tornado cada vez mais rápido. Hoje, na era dos computadores, o transistor ainda tem lugar de destaque e suas aplicações se estendem a milhares de circuitos com as mais diversas finalidades.

Este fascículo tratará do princípio de funcionamento do transistor bipolar, fornecendo informações indispensáveis para que o leitor esteja capacitado a montar e reparar circuitos transistorizados.

Para a boa compreensão do conteúdo e desenvolvimento das atividades contidas neste fascículo, o leitor deverá estar familiarizado com os conceitos relativos a:

- Diodo semicondutor.
- Transistor bipolar: estrutura básica e testes.

Princípio de operação

Para que os portadores se movimentem no interior da estrutura de um transistor é necessário aplicar tensões entre os seus terminais. O movimento dos elétrons livres e lacunas está intimamente relacionado à polaridade da tensão aplicada a cada par de terminais do transistor, como descrito a seguir.

OPERAÇÃO DO TRANSISTOR NA REGIÃO ATIVA

A estrutura física do transistor propicia a formação de duas junções *pn*, conforme ilustrado na **Fig.1**:

- Uma junção *pn* entre o cristal da base e o cristal do emissor, chamada de **junção base-emissor**.

- Uma junção *pn* entre o cristal da base e o cristal do coletor, chamada de **junção base-coletor**.

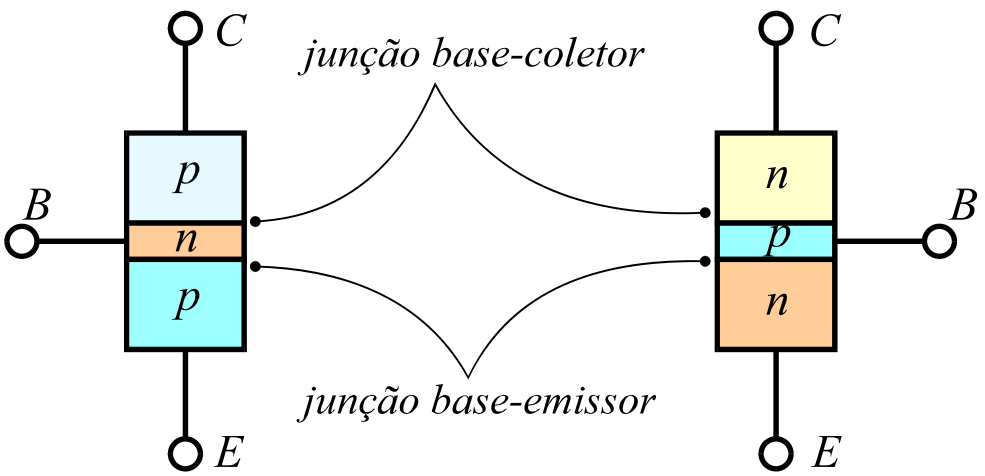


Fig.1 Junções base-coletor e base-emissor em um transistor.

A formação das duas junções no transistor faz que ocorra um processo de difusão dos portadores. Como no caso do diodo, esse processo de difusão dá origem a uma barreira de potencial em cada junção.

No transistor, portanto, existem duas barreiras de potencial, mostradas na **Fig.2,** que se formam a partir da junção dos cristais semicondutores:

- A barreira de potencial na junção base-emissor.
- A barreira de potencial na junção base-coletor.

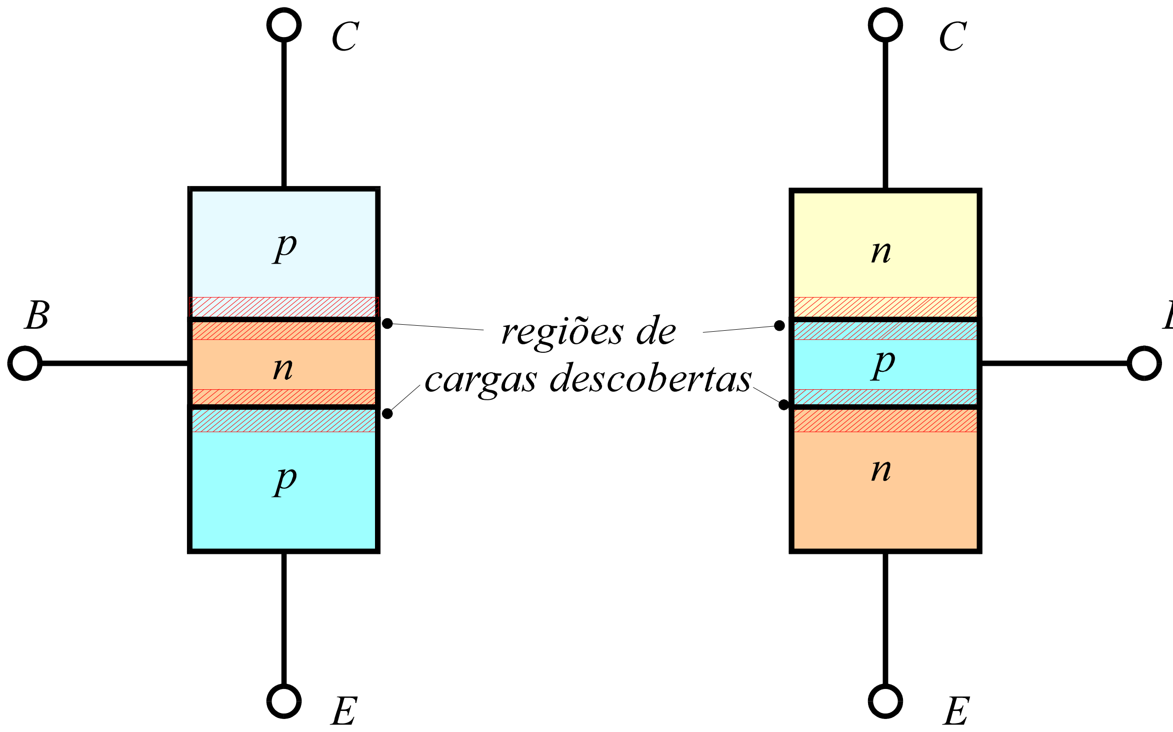


Fig.2 Barreiras de potencial formadas nas duas junções de um transistor.

As características normais de polarização dos terminais do transistor são sumarizadas a seguir.

JUNÇÃO BASE-EMISSOR

Na condição normal de funcionamento, denominada de **funcionamento na região ativa**, a junção base-emissor fica polarizada diretamente, conforme ilustrado na **Fig.3**.

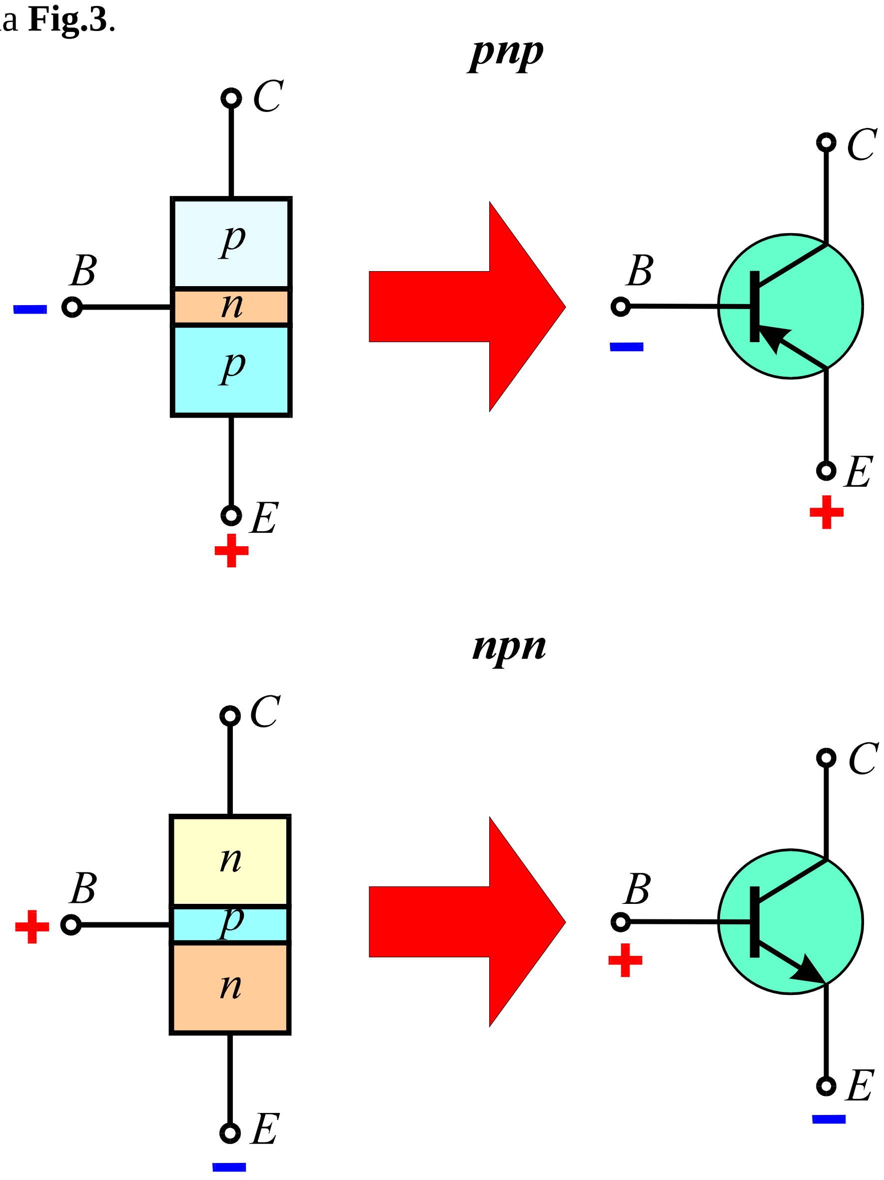


Fig.3 Polarização da junção base-emissor de transistores *pnp* e *npn* para operação na região ativa.

A condução através da junção base-emissor é provocada pela aplicação de uma tensão externa entre a base e o emissor, com polarização direta, ou seja, com o material tipo *p* tendo polarização positiva com relação ao material tipo *n*.

Na região ativa a junção base-emissor de um transistor fica diretamente polarizada.

JUNÇÃO BASE-COLETOR

Para operação na região ativa, a junção base-coletor fica polarizada inversamente, ou seja, com o material tipo *p* polarizado negativamente em relação ao material tipo *n*, conforme mostrado na **Fig.4**.

Na região ativa a junção base-coletor de um transistor fica inversamente polarizada.

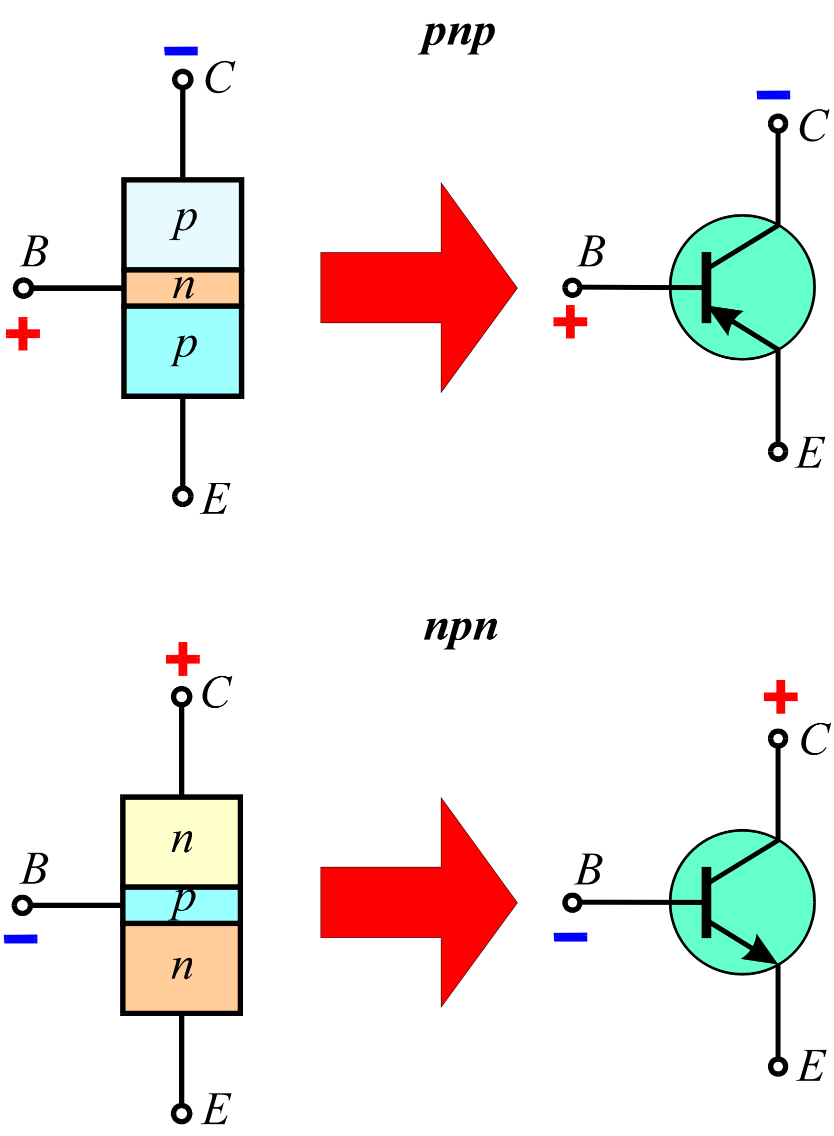


Fig.4 Polarização da junção base-coletor de transistores *pnp* e *npn* para operação na região ativa.

POLARIZAÇÃO SIMULTÂNEA DAS DUAS JUNÇÕES

Para que o transistor funcione adequadamente, as duas junções devem ser polarizadas simultaneamente. Isso é feito aplicando-se tensões externas nas duas junções do componente. A **Fig.5** mostra a forma de polarização de um transistor para operação na região ativa.

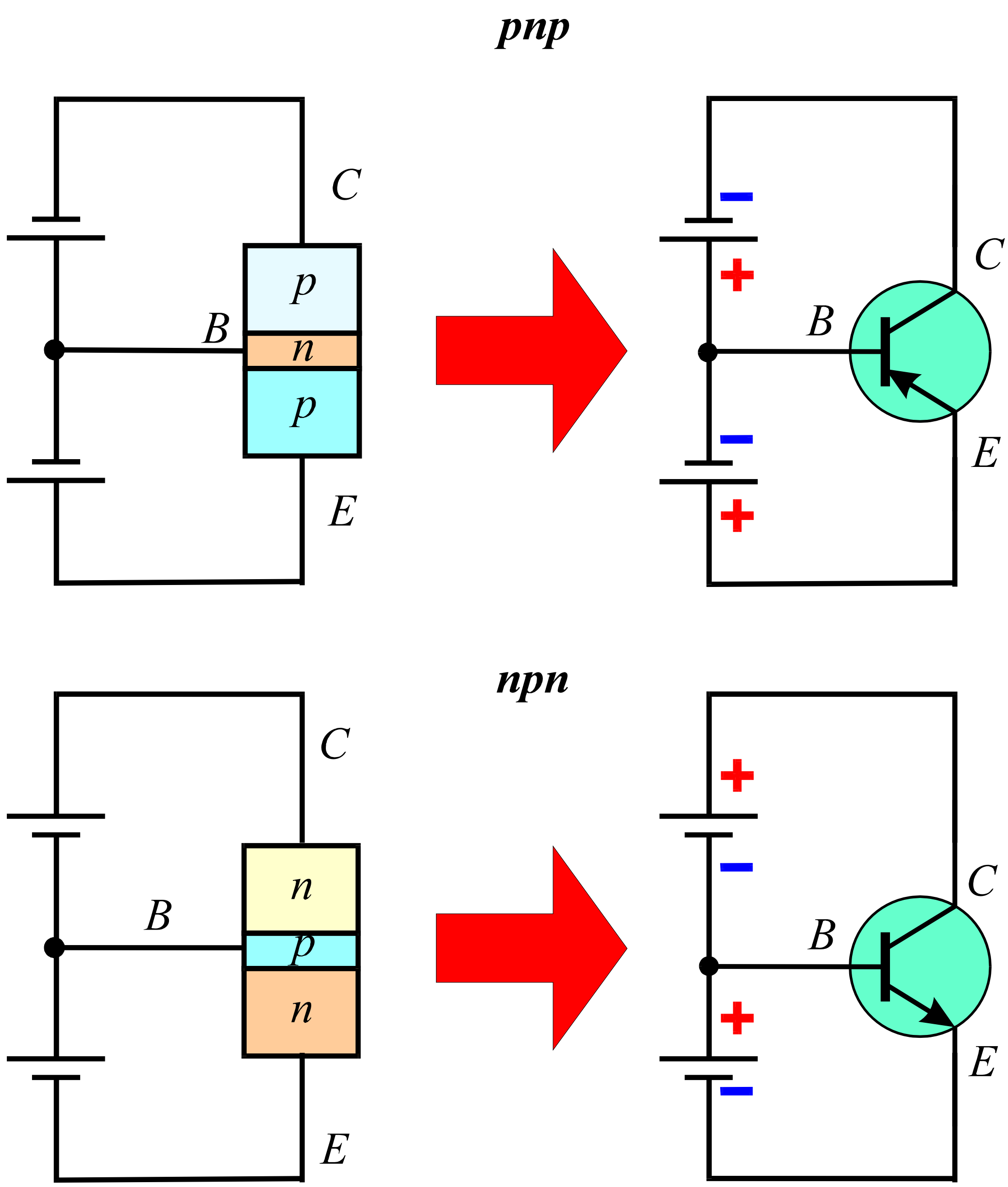


Fig.5 Polarizações dos transistores *npn* e *pnp* para operação na região ativa.

Uma forma alternativa de configuração, que permite obter a operação do transistor na região ativa é mostrada na **Fig.6**, para o caso de um transistor *npn*.

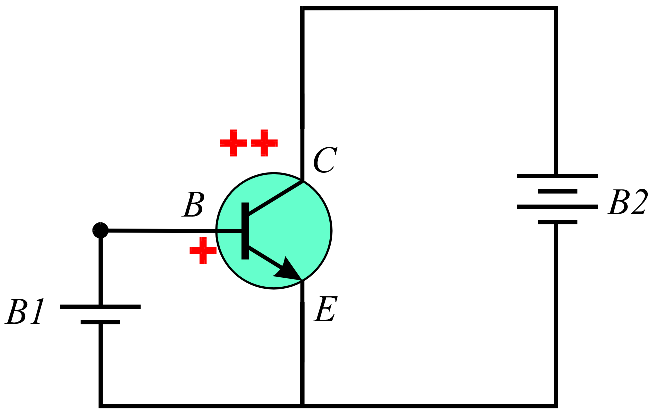


Fig.6 Configuração alternativa para operação de um transistor *npn* na região ativa.

Uma inspeção do diagrama de circuito mostrado na **Fig.6** permite extrair as seguintes observações:

- A bateria *B1* polariza diretamente a junção base-emissor.
- A bateria *B2* submete o coletor a um potencial mais elevado do que aquele aplicado à base.

Dessa forma, a junção base-coletor está submetida a uma polarização inversa, o que juntamente com a polarização direta aplicada à junção base-emissor, possibilita operação na região ativa do transistor. Conclui-se portanto que os dois esquemas mostrados na **Fig.7** produzem polarizações equivalentes nas junções do transistor.

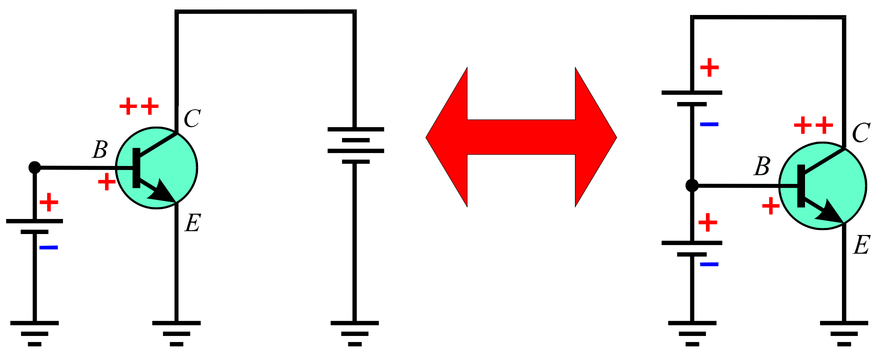


Fig.7 Diagramas de circuito que permitem a operação de um transistor *npn* na região ativa.

Em resumo, para operação de um transistor na região ativa, tem-se:

- Polarização direta da junção base-emissor.
- Polarização inversa da junção base-coletor.

A alimentação simultânea das duas junções, através de baterias externas, dá origem a três tensões entre os terminais do transistor:

- Tensão base-emissor, representada pelo parâmetro V_{BE}.
- Tensão coletor-base, representada pelo parâmetro V_{CB}.
- Tensão coletor-emissor, representada pelo parâmetro V_{CE}.

Esses parâmetros estão representados na **Fig.8** para os transistores *pnp* e *npn*. Como pode ser aí observado, as tensões entre os terminais são definidas matematicamente pelas relações

$$V_{BE} = V_B - V_E \tag{1}$$

$$V_{CB} = V_C - V_B \tag{2}$$

$$V_{CE} = V_C - V_E \tag{3}$$

onde V_B, V_C e V_E são os potenciais elétricos na base, coletor e emissor, respectivamente.

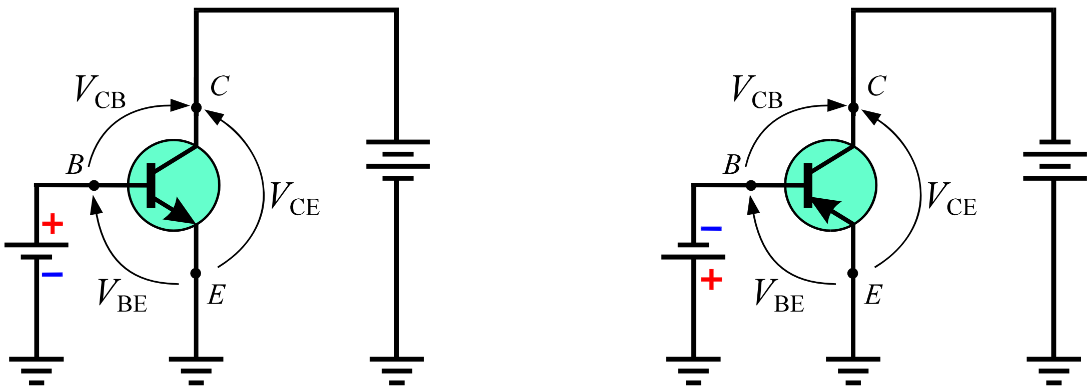


Fig.8 Tensões nas junções dos transistores *pnp* e *npn*.

Com base na **Fig.8**, ou alternativamente, somando as **Eqs.(1)** e **(2)** e comparando com a **Eq.(3),** tem-se que as tensões entre terminais satisfazem a condição

$$V_{CE} = V_{CB} + V_{BE} \tag{4}$$

Na **Fig.8** as baterias externas estão polarizadas de forma a permitir a operação do diodo na região ativa. Nessas condições, as tensões definidas nas **Eqs.(1)** a **(3)** devem assumir os sinais indicados na **Tabela 1**.

Tabela 1 Sinais das tensões entre terminais para os transistores *pnp* e *npn*.

Tensão	Transistor *pnp*	Transistor *npn*
V_{BE}	negativa	positiva
V_{CB}	negativa	positiva
V_{CE}	negativa	positiva

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO TRANSISTOR BIPOLAR

A aplicação de tensões externas ao transistor provoca o movimento de elétrons livres e lacunas no interior da estrutura cristalina, dando origem às correntes nos terminais do transistor. Utiliza-se como representação de circuito para essas correntes aquela indicada na **Fig.9**.

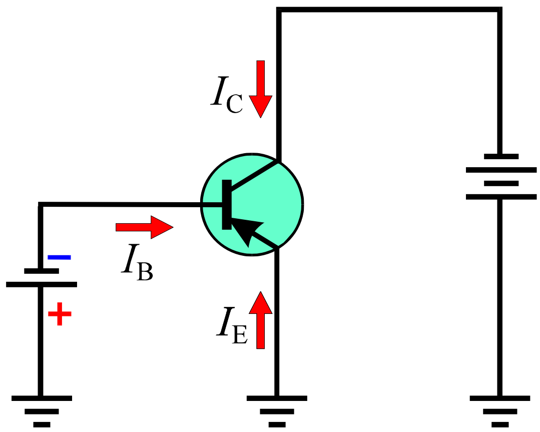


Fig.9 Representação de circuito das correntes nos terminais de um transistor.

As correntes definidas na **Fig.9**, recebem as seguintes denominações:

- I_B = corrente de base.
- I_C = corrente de coletor.
- I_E = corrente de emissor.

O sentido das correntes representadas na **Fig.9** segue uma convenção que estabelece:

Correntes positivas são aquelas que fluem do circuito externo para os terminais do transistor.

De acordo com essa convenção as correntes nos terminais do transistor satisfazem a relação

$$I_B + I_C + I_E = 0 \tag{5}$$

Seguindo a convenção adotada, para transistores *npn* e *pnp* operando na região ativa, os sinais das três correntes definidas anteriormente são aqueles indicados na **Tabela 2**, conforme ilustrado na **Fig.10**.

Tabela 2 Sinais das correntes nos terminais dos transistores *pnp* e *npn* para operação na região ativa.

Corrente	Transistor *pnp*	Transistor *npn*
I_B	negativa	positiva
I_C	negativa	positiva
I_E	positiva	negativa

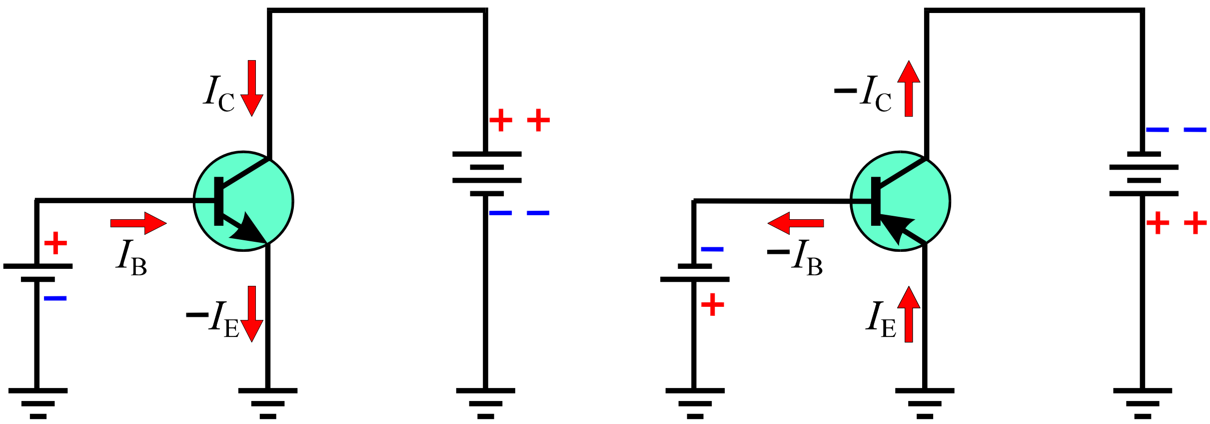


Fig.10 Sentido real das correntes nos transistores *npn* e *pnp* para operação na região ativa.

O princípio básico que explica a origem das correntes no transistor é o mesmo para estruturas *npn* e *pnp*, e a análise do movimento de portadores de carga pode ser realizada tomando-se como exemplo qualquer das duas estruturas. Isso é feito a seguir para a análise das correntes em um transistor *pnp* posto em operação na região ativa.

CORRENTE DE BASE

A corrente de base é produzida pela aplicação de uma tensão que polariza diretamente a junção base-emissor e cujo efeito é semelhante àquele observado em um diodo semicondutor polarizado diretamente.

Como ilustrado na **Fig.11**, a aplicação de uma tensão positiva

$$V_{EB}=V_E-V_B$$

com um valor superior ao potencial de barreira da junção base-emissor, facilita a injeção de lacunas do emissor para a base e de elétrons livres no sentido inverso. Como no caso de uma junção semicondutora comum, o potencial de barreira é tipicamente 0,6 a 0,7 V para o silício e 0,2 a 0,3V para o germânio.

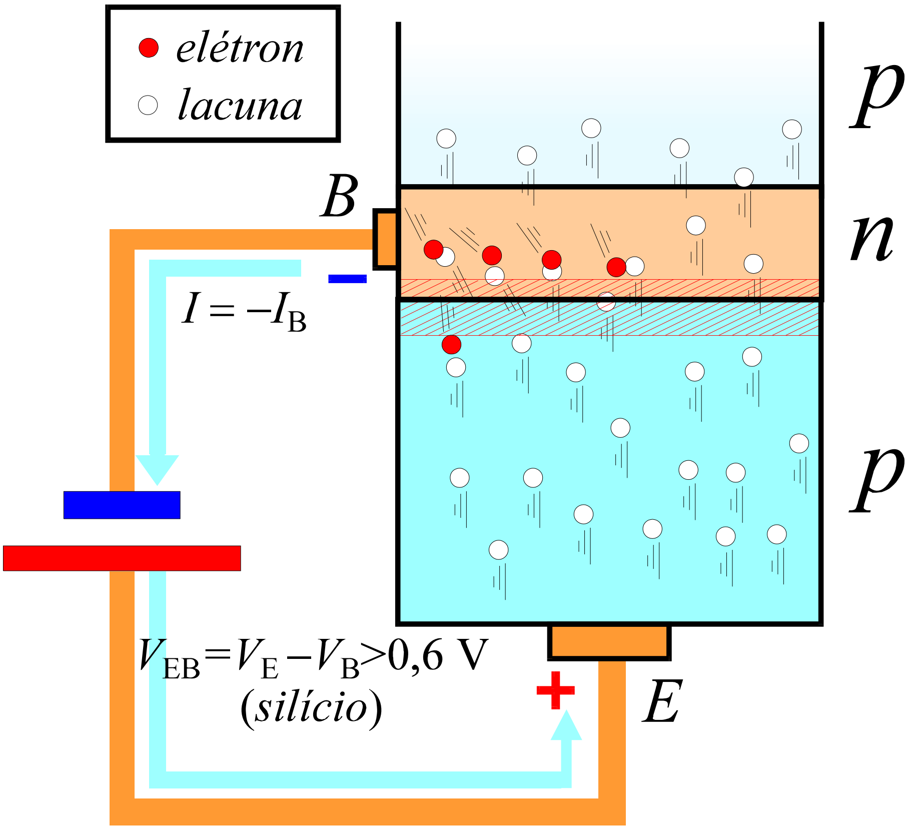


Fig.11 Movimento de portadores nas proximidades da junção base-emissor quando esta é polarizada diretamente.

Transistores são construídos com o emissor tendo um grau de dopagem muito superior àquele da base. Dessa forma o fluxo de portadores ocorre predominantemente por parte das lacunas injetadas na base.

A pequena quantidade de elétrons disponíveis na base se recombina com parte das lacunas aí injetadas, dando origem à corrente de base. Com o pequeno grau de dopagem da base, poucas recombinações ocorrem, resultando em um pequeno valor para a corrente de base, normalmente na faixa de microampères a miliampères.

Assim, a maior parte das lacunas provenientes do emissor não se recombina com os elétrons da base, podendo portanto atingir a junção base-coletor.

Em um transistor pnp corrente de base é provocada pela aplicação de uma tensão $V_{EB} > 0$ ligeiramente superior ao potencial de barreira da junção base-emissor. Essa corrente é muito pequena devido ao pequeno grau de dopagem da base.

CORRENTE DE COLETOR

Devido à pequena espessura da região da base e também ao seu pequeno grau de dopagem, o excesso de lacunas que não se recombinaram com os elétrons naquela região atingem a junção base-coletor, conforme ilustrado na **Fig.12**. Como a junção base-coletor está inversamente polarizada, essas lacunas são aceleradas pela queda de potencial existente naquela junção, dando origem à corrente de coletor.

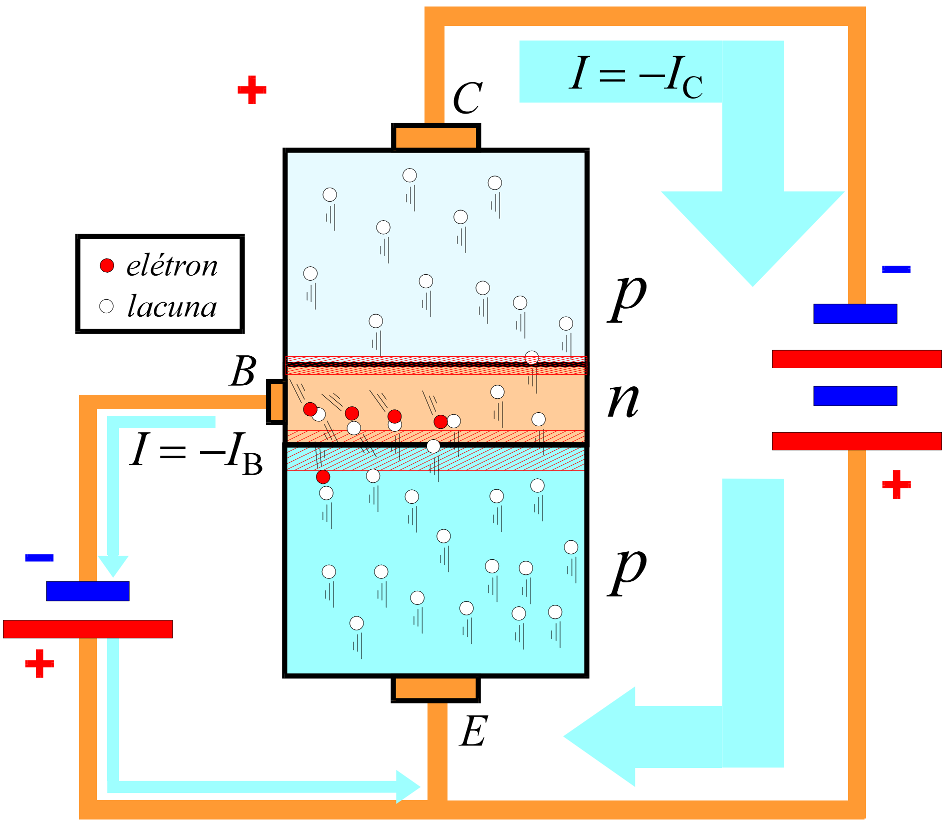


Fig.12 Movimento de portadores e correntes resultantes nos terminais de um transistor *pnp*.

A corrente de coletor tem um valor muito superior à corrente de base porque a grande maioria das lacunas provenientes do emissor não se recombinam com os elétrons da base, sendo portanto injetadas diretamente no coletor.

Tipicamente, um máximo de 5% do total de lacunas provenientes do emissor produz a corrente de base, com o restante dando origem à corrente de coletor. Essa grande diferença entre as correntes de base e de coletor está ilustrada na **Fig.13**.

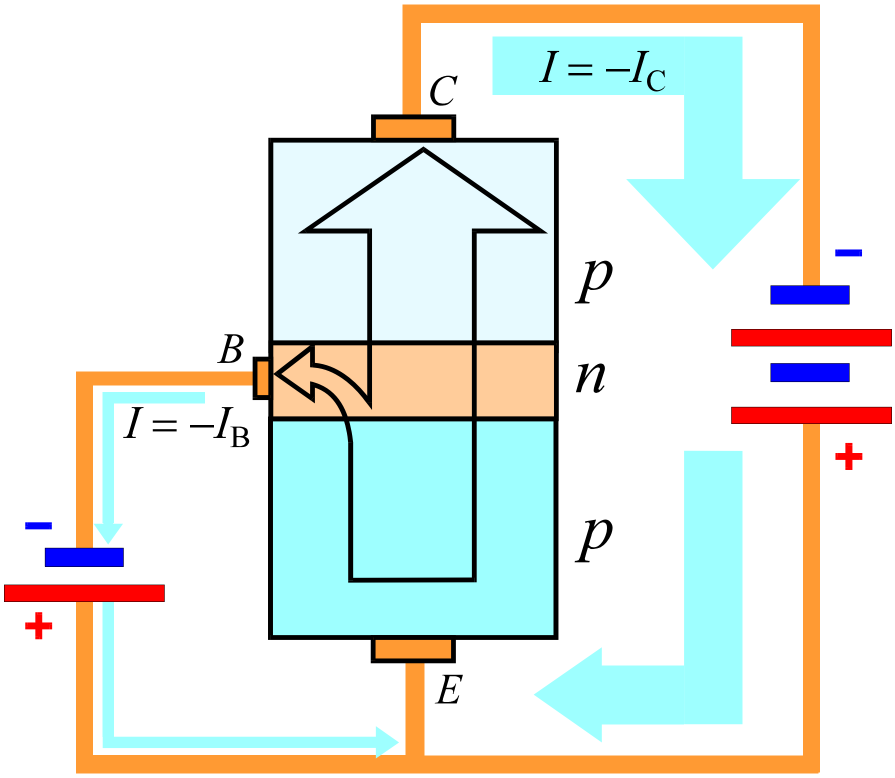


Fig.13 Comparação entre as correntes de base e de coletor em um transistor *pnp*.

CORRENTE DE EMISSOR

A partir da discussão das seções anteriores, e de acordo com o princípio da conservação da carga estabelecido pela **Eq.(5)**, a corrente de emissor pode ser obtida da relação

$$I_E = (-I_B) + (-I_C) \qquad (6)$$

De acordo com a convenção adotada para definir as correntes nos terminais do transistor, os sinais a elas atribuídos indicados na **Tabela 2**, são

compatíveis com os sentidos dos fluxos de corrente, mostrados na **Fig.14**. Conseqüentemente, para o transistor *pnp* operando na região ativa:

- $I_B < 0 \Rightarrow (-I_B) > 0$, indicando que a corrente na base flui do terminal *B* para o circuito.
- $I_C < 0 \Rightarrow (-I_C) > 0$, indicando que a corrente no coletor flui do terminal *C* para o circuito.
- $I_E > 0$ indica que a corrente no emissor flui do circuito para o terminal *E*.

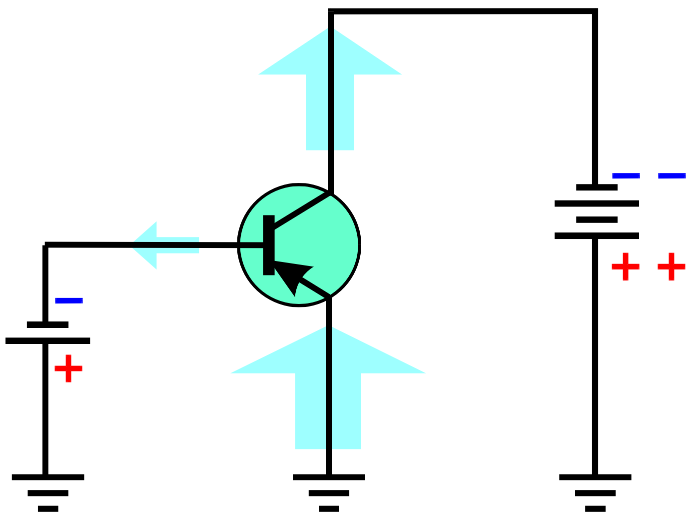


Fig.14 Sentidos das correntes em um transistor *pnp* operando na região ativa.

CONTROLE DE CORRENTE NO TRANSISTOR

A principal característica do transistor reside no fato de a corrente de base poder controlar eficientemente a corrente de coletor. A corrente de base pode ser modificada pelo ajuste externo da tensão na junção base-emissor, conforme ilustrado na **Fig.15**.

Dessa forma, qualquer variação na tensão da fonte aparece diretamente como uma variação na altura da barreira de potencial da junção base-emissor, fazendo que mais ou menos portadores provenientes do emissor sejam injetados na base. Como as correntes de base e de coletor variam em proporção direta com o número de portadores provenientes do emissor, conclui-se que variações na

tensão aplicada à junção base-emissor, ou equivalentemente na corrente de base, causam variações na corrente de coletor.

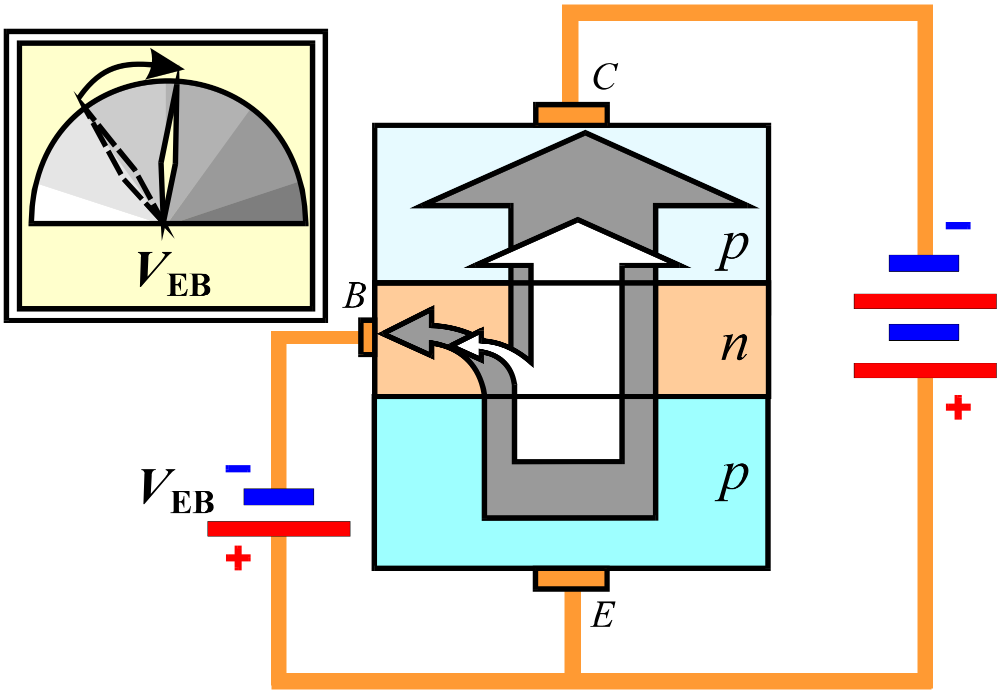


Fig.15 Influência da corrente de base na corrente de coletor de um transistor.

Nota-se que apesar de a corrente de base ser de pequeno valor, ela atua essencialmente de forma a liberar a passagem de mais ou menos corrente do emissor para o coletor. Dessa forma a corrente de base atua como corrente de controle, e a corrente de coletor, como corrente controlada.

GANHO DE CORRENTE DO TRANSISTOR

Como discutido na seção anterior, através de um transistor é possível utilizar um pequeno valor de corrente I_B para controlar a circulação de uma corrente I_C, de valor bem mais elevado.

Uma medida da relação entre a corrente controlada I_C e a corrente de controle I_B pode ser obtida do parâmetro

$$\beta_{DC} \equiv \frac{I_C}{I_B} \qquad (7)$$

definido como o **ganho de corrente contínua entre base e coletor**.

Como na região ativa as correntes I_C e I_B têm o mesmo sinal, nesse regime de operação o parâmetro β_{DC} é um número positivo.

Cada transistor é fabricado com um valor bem definido para o parâmetro β_{DC}, que depende das características materiais e estruturais do componente e do regime de operação do transistor. Da **Eq.(7)** tem-se que

$$I_C = \beta_{DC} I_B \tag{8}$$

A **Eq.(8)** mostra que a corrente de coletor é diretamente proporcional à corrente de base, e que I_C pode ser calculado a partir do conhecimento dos valores de β_{DC} e I_B.

É importante salientar que o fato de o transistor permitir a obtenção de um ganho de corrente entre base e coletor não implica em criação de correntes no interior da estrutura. **Todas as correntes que circulam em um transistor são provenientes das fontes de alimentação, com a corrente de base atuando no sentido de liberar a passagem de mais ou menos corrente do emissor para o coletor.**

Os transistores não geram ou criam correntes internamente, atuando apenas como controladores do nível de corrente fornecido externamente.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. De que forma deve-se polarizar os transistores *pnp* e *npn* para operação na região ativa?

2. Quais os sentidos reais das correntes em um transistor *pnp* polarizado na região ativa?

3. Repetir a questão anterior para o caso de um transistor *npn*.

4. Qual o valor típico da tensão V_{BE} de um transistor *pnp* para operação na região ativa?

5. Repetir a questão anterior para o caso de um transistor *npn*.

6. Que fração típica da corrente proveniente do emissor de um transistor *pnp* flui para a base quando o componente opera na região ativa?

7. Para um transistor *npn* operando com I_B = 10 μA e I_C = 1 mA, calcule o ganho de corrente contínua entre base e coletor.

BIBLIOGRAFIA

ARNOLD, Robert & BRANT, Hans. Transistores, segunda parte. São Paulo, EPU, 1975. il. (Eletrônica Industrial, 2).

CIPELLI, Antônio Marco Vicari & SANDRINI, Valdir João. Teoria do desenvolvimento de Projetos de Circuitos Eletrônicos . 7.ed. São Paulo, Érica, 1983. 580p.

SENAI/ Departamento Nacional. Reparador de circuitos eletrônicos; eletrônica básica II. Rio de Janeiro, Divisão de Ensino e Treinamento, c 1979. (Coleção Básica Senai, Módulo 1).

TUCCI, Wilson José. Introdução à Eletrônica. 7.ed. São Paulo, Nobel, 1983. 349p.

MILLMAN, Jacob e HALKIAS, Christos C., Integrated electronics: analog and digital circuits and systems, São Paulo, McGraw-Hill, 1972.

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Introdução

As tensões e correntes presentes nos terminais de um transistor estão diretamente relacionadas entre si. Este é o caso por exemplo, da relação existente entre as correntes no transistor que pode ser utilizada para determinar de que forma variações na corrente de base afetam as outras correntes no componente.

Para obter sucesso na montagem, teste ou reparo de circuitos transistorizados é necessário conhecer perfeitamente como e por que se relacionam as tensões e correntes em um transistor.

Este fascículo, que trata das relações entre os parâmetros de circuito do transistor bipolar, foi elaborado com o objetivo de fornecer ao leitor os conhecimentos fundamentais necessários à produção, teste e manutenção de circuitos eletrônicos.

Para a boa compreensão do conteúdo e desenvolvimento das atividades contidas neste fascículo, o leitor deverá estar familiarizado com os conceitos relativos a:

- Lei de Ohm.
- Leis de Kirchhoff.
- Transistor bipolar: princípio de funcionamento.

O circuito do coletor

Na grande maioria dos circuitos transistorizados, o coletor do transistor é conectado à fonte de alimentação através de um **resistor de coletor**, representado pelo parâmetro R_C, conforme ilustrado na **Fig.1**.

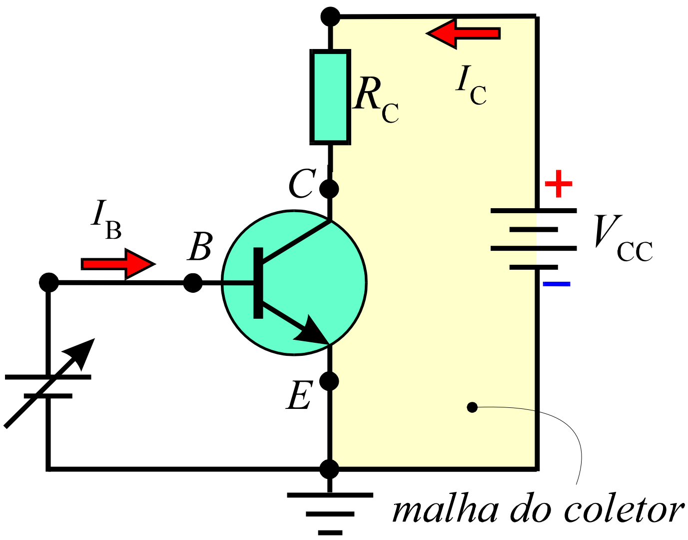


Fig.1 Circuito a transistor com resistor de coletor.

O resistor de coletor completa a **malha do coletor**, ilustrada na **Fig.1,** que é a porção do circuito composta pelo grupo de componentes onde circula a corrente de coletor. Como pode ser aí observado estes componentes são o resistor R_C, a fonte de alimentação V_{CC} e a porção do transistor entre os terminais do coletor e do emissor.

Com base na **Fig.2**, a aplicação da segunda lei de Kirchhoff à malha do coletor fornece

$$V_{CC} = V_{Rc} + V_{CE} \tag{1}$$

onde:

- V_{CC} representa a tensão da fonte de alimentação.
- V_{Rc} representa a queda de tensão no resistor R_C.
- V_{CE} representa a tensão coletor-emissor.

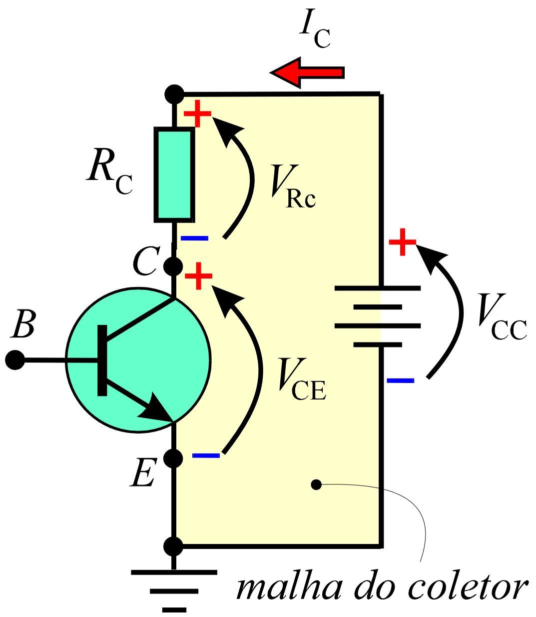


Fig.2 Parâmetros de circuito da malha do coletor.

Desprezando-se a resistência interna da fonte de alimentação, a tensão por ela fornecida independe da corrente solicitada pelo circuito. Da lei de Ohm, a queda de tensão no resistor de coletor é relacionada à corrente na malha pela relação

$$V_{Rc} = R_C I_C \tag{2}$$

Como se pode notar da **Eq.(2)**, a queda de tensão no resistor varia proporcionalmente à corrente de coletor.

A tensão coletor-emissor V_{CE} é o último termo da equação da malha de coletor. A partir da **Eq.(1)**, tem-se que

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C \tag{3}$$

o que indica que a tensão coletor-emissor depende dos valores da tensão de alimentação e da queda de tensão no resistor R_C.

O exemplo a seguir ilustra o emprego das equações da malha do coletor.

<u>Exemplo 1:</u> Para o circuito da **Fig.3**, o resistor de coletor é de 680Ω. Com a fonte de alimentação fornecendo uma tensão de 12 V, a corrente de coletor é de 6 mA. Determinar a tensão coletor-emissor.

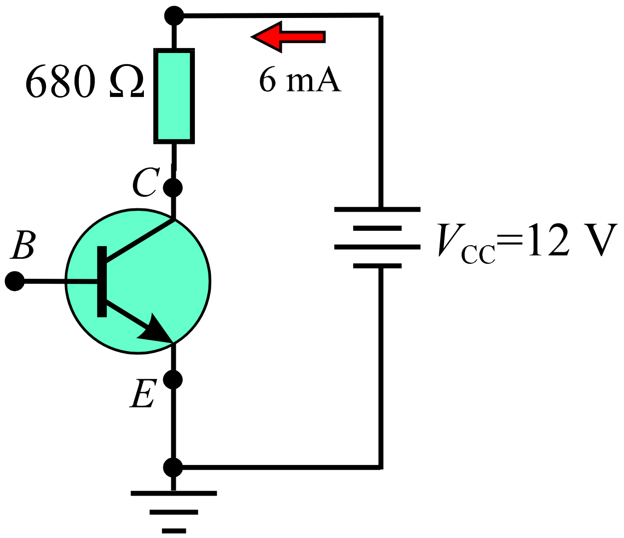


Fig.3 Circuito a transistor para o **Exemplo 1**.

A queda de tensão no resistor de coletor pode ser calculada da **Eq.(2)** resultando em

$$V_{Rc} = 680\Omega \times 0{,}006\text{A} = 4{,}08\text{ V}$$

Utilizando $V_C = 12$ V e o valor obtido para a tensão no resistor de coletor na **Eq.(3)** tem-se que

$$\boxed{V_{CE} = 12\text{V} - 4{,}08\text{V} = 7{,}92\text{V}}$$

Influência da corrente de base

Como discutido em fascículos anteriores, na região ativa a corrente de coletor é proporcional a corrente de base de acordo com a relação

$$I_C = \beta I_B \tag{4}$$

com β representando o ganho de corrente do transistor.

Pela **Eq.(2)** a queda de tensão no resistor de coletor também é proporcional à corrente de coletor. A forma que a tensão V_{Rc} é influenciada pela corrente de base pode ser determinada inserindo a **Eq.(4)** na **Eq.(2)**, fornecendo

$$V_{Rc} = R_C I_C = R_C(\beta I_B)$$

ou alternativamente

$$V_{Rc} = (\beta R_C) I_B \tag{5}$$

A **Eq.(5)** mostra que com valores constantes do resistor de coletor e do ganho de corrente do transistor na região ativa, a tensão no resistor de coletor é diretamente proporcional à corrente de base.

A forma que a tensão coletor-emissor é influenciada pela corrente de base pode ser obtida inserindo a **Eq.(5)** na **Eq.(3)**, resultando em

$$V_{CE} = V_{CC} - (\beta R_C) I_B \tag{6}$$

O sinal negativo na frente do segundo termo do segundo membro da **Eq.(6)** indica que a tensão coletor-emissor diminui quando a corrente de base aumenta e aumenta quando a corrente de base diminui.

A influência da corrente de base nos parâmetros da malha do coletor, definida a partir das **Eqs.(4)** a **(6)**, pode ser representada diagramaticamente como indicado na **Tabela 1**.

Tabela 1 Influência da corrente de base nos parâmetros da malha do coletor.

I_B	I_C	V_{Rc}	V_{CE}
⇑	⇑	⇑	⇓
⇓	⇓	⇓	⇑

Exemplo 2: Para o circuito representado na **Fig.4**, a base do transistor é conectada à fonte V_{BB} por um resistor limitador R_B. Determinar os parâmetros da malha do coletor para: (a) I_B = 40 μA, (b) I_B = 70 μA.

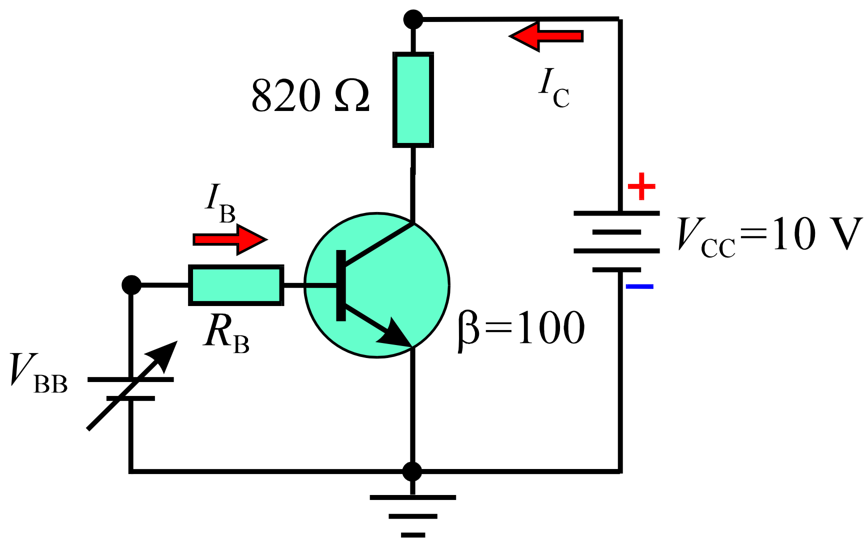


Fig.4 Circuito a transistor para o **Exemplo 2**.

(a) I_B = 40 μA :

Da **Fig.4** tem-se que, R_C = 820 Ω, V_{CC} = 10 V, β = 100. Da **Eq.(4)** resulta

$$I_C = 100 \times 40\,\mu\text{A} = 4000\,\mu\text{A} = 4\,\text{mA}$$

Da **Eq.(2)** obtém-se

$$V_{Rc} = 820\,\Omega \times 0{,}004\,\text{A} = 3{,}24\,\text{V}$$

Da **Eq.(6)** tem-se que

$$V_{CE} = 10\ \text{V} - 3{,}24\ \text{V} = 6{,}76\ \text{V}$$

(b) $I_B = 70\ \mu A$:

Repetindo o mesmo procedimento do item (a), obtém-se

$$I_C = 7\ \text{mA}\ , V_{Rc} = 5{,}74\ \text{V}\ , V_{CE} = 4{,}26\ \text{V}$$

Nota-se portanto que o aumento da corrente de base causa as variações nos parâmetros da malha do coletor, indicadas na **Tabela 1**. Dos resultados obtidos nos itens (a) e (b) vale observar que um aumento de apenas $70\ \mu A - 40\ \mu A = 30\ \mu A$, na corrente de base provoca um aumento de $7\ mA – 4\ mA = 3\ mA$, na corrente de coletor.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Repita o **Exemplo 1** utilizando $I_C = 5$ mA.

2. Repita o **Exemplo 2** utilizando $I_B = 50$ µA e $R_B = 500\ \Omega$.

BIBLIOGRAFIA

ARNOLD, Robert & BRANT, Hans. Transistores, segunda parte. São Paulo, EPU, 1975. il. (Eletrônica Industrial, 2).

CIPELLI, Antônio Marco Vicari & SANDRINI, Valdir João. Teoria do desenvolvimento de Projetos de Circuitos Eletrônicos . 7.ed. São Paulo, Érica, 1983. 580p.

SENAI/ Departamento Nacional. Reparador de circuitos eletrônicos; eletrônica básica II. Rio de Janeiro, Divisão de Ensino e Treinamento, c 1979. (Coleção Básica Senai, Módulo 1).

TUCCI, Wilson José. Introdução à Eletrônica. 7.ed. São Paulo, Nobel, 1983. 349p.

MILLMAN, Jacob e HALKIAS, Christos C., Integrated electronics: analog and digital circuits and systems, São Paulo, McGraw-Hill, 1972.

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Introdução

A descoberta do transistor determinou o final da era das válvulas eletrônicas, uma vez que a partir do emprego daquele componente foi possível desenvolver circuitos eletrônicos operando a baixas voltagens compondo montagens substancialmente mais compactas, eliminando as limitações inerentes às válvulas que, por envelhecimento, eram freqüentemente substituídas nos equipamentos eletrônicos.

Apesar dessas vantagens, o transistor também tem as suas limitações. Um dos fatores mais importantes com respeito a essas limitações se refere àquela imposta pelo aquecimento do componente.

Este fascículo trata dos fatores associados ao aquecimento do transistor e das correntes de fuga presentes no componente, com o objetivo de capacitar o leitor a conhecer os limites de operação que deverão ser observados quando da utilização de transistores em circuitos eletrônicos.

Para a boa compreensão do conteúdo e desenvolvimento das atividades contidas neste fascículo, o leitor deverá estar familiarizado com os conceitos relativos a:

- Dissipação de potência.
- Diodo semicondutor.
- Transistor bipolar: princípio de operação.

Dissipação de potência no transistor

Todo componente sujeito a uma diferença de potencial V e percorrido por uma corrente I consome uma potência

$$P = VI \qquad (1)$$

Pode-se citar, por exemplo, o caso de uma lâmpada que ao estar submetida a uma diferença de potencial entre seus terminais é percorrida por uma corrente, dissipando energia em forma de luz e calor.

O transistor consome potência devido à circulação de corrente elétrica através das junções, provocada pela aplicação de tensões entre os seus terminais. Essa potência dissipada na forma de calor, resulta em um aquecimento do componente.

POTÊNCIA FORNECIDA AO TRANSISTOR

O transistor é um componente de três terminais, conforme ilustrado na **Fig.1**. Admitindo os sentidos de corrente e os potenciais nos terminais aí indicados, a potência fornecida ao transistor pelas fontes externas pode ser calculada da relação

$$P_{total} = V_C I_C + V_B I_B + V_E I_E \qquad (2)$$

com os parâmetros I_C, I_B e I_E, representando as correntes fluindo do circuito para os terminais do transistor e V_C, V_B e V_E, correspondendo aos

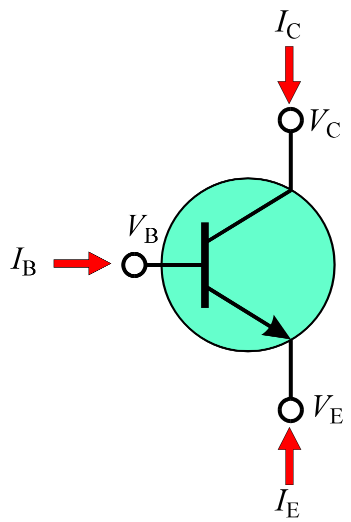


Fig.1 Grandezas elétricas associadas aos terminais de um transistor.

potenciais nos terminais *C*, *B* e *E*, respectivamente.

Sem alteração da **Eq.(2)** pode-se escrever

$$P_{\text{total}} = V_{\text{C}} I_{\text{C}} + (V_{\text{E}} I_{C} - V_{\text{E}} I_{\text{C}}) + V_{\text{B}} I_{\text{B}} + (V_{\text{E}} I_{\text{B}} - V_{\text{E}} I_{\text{B}}) + V_{\text{E}} I_{\text{E}}$$

ou seja, os termos entre parêntesis são todos nulos e não alteram a **Eq.(2)**.

Reagrupando os termos da expressão anterior, tem-se que

$$P_{\text{total}} = (V_{\text{C}} - V_{\text{E}}) I_{\text{C}} + (V_{\text{B}} - V_{\text{E}}) I_{\text{B}} + V_{\text{E}} (I_{\text{C}} + I_{\text{B}} + I_{\text{E}}) \quad (3)$$

Com base na **Fig.1** as quedas de tensão entre os terminais *C* e *E* e entre os terminais *B* e *E* podem ser obtidas das relações

$$V_{\text{CE}} = V_{\text{C}} - V_{\text{E}} \quad (4)$$

$$V_{\text{BE}} = V_{\text{B}} - V_{\text{E}} \quad (5)$$

Substituindo as **Eqs.(4)** e **(5)** na **Eq.(3)** vem

$$P_{\text{total}} = V_{\text{CE}} I_{\text{C}} + V_{\text{BE}} I_{\text{B}} + V_{\text{E}} (I_{\text{C}} + I_{\text{B}} + I_{\text{E}}) \quad (6)$$

Pela 1[a]. lei de Kirchhoff, a soma das correntes que fluem do circuito para os terminais do transistor da **Fig.1** é nula, i.e.,

$$I_{\text{C}} + I_{\text{B}} + I_{\text{E}} = 0 \quad (7)$$

e conseqüentemente, o último termo entre parêntesis da **Eq.(6)** é nulo, resultando em

$$P_{\text{total}} = V_{\text{CE}} I_{\text{C}} + V_{\text{BE}} I_{\text{B}} \quad (8)$$

A **Eq.(8)** mostra que a potência fornecida ao transistor é a soma de dois termos:

- A **potência de coletor**, definida pela relação

$$P_{\text{C}} = V_{\text{CE}} I_{\text{C}} \quad (9)$$

- A **potência de base**, definida pela relação

$$P_B = V_{BE} I_B \qquad (10)$$

DISSIPAÇÃO MÁXIMA NO TRANSISTOR

Nas **Eqs.(8)** a **(10)** deve-se utilizar a convenção de sinais e as definições para as correntes e tensões nos terminais do transistor. Dessa forma, para um transistor *npn* operando na região ativa os parâmetros I_C, I_B, V_{CE} e V_{BE} são todos positivos, sendo todos negativos para o caso de um transistor *pnp*. Assim, as potências obtidas das **Eqs.(8)** a **(10)** são sempre números positivos.

Como discutido em fascículos anteriores, considerando o transistor operando na região ativa, conforme ilustrado na **Fig.2**, tem-se que $I_B << I_C$. Além disso, como na região ativa a junção base-emissor é polarizada diretamente

$$V_{BE} \approx 0{,}2 \text{ a } 0{,}3 \text{ V (germânio)}$$

$$V_{BE} \approx 0{,}6 \text{ a } 0{,}7 \text{ V (silício)}$$

e esses valores típicos são sempre bem inferiores à tensão coletor-emissor em condições normais de operação do transistor.

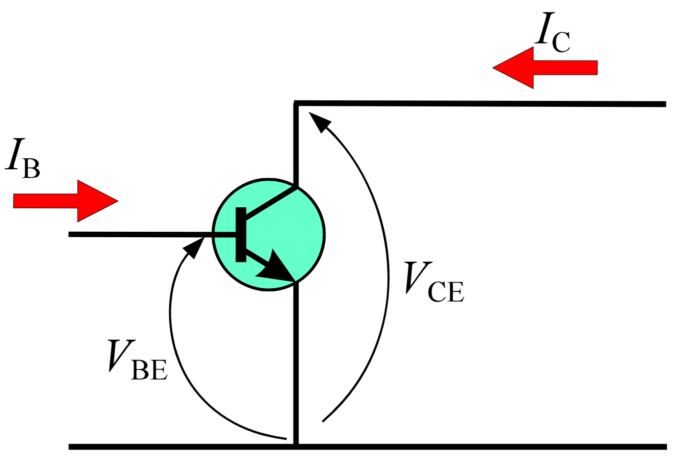


Fig.2 Transistor *npn* operando na região ativa.

Com essas considerações, conclui-se a partir das **Eqs.(9)** e **(10)** que as potências P_C e P_B satisfazem à condição

$$P_C = V_{CE} I_C >> V_{BE} I_B = P_B$$

ou seja, a potência de coletor é muito superior à potência de base do transistor. Isso permite desprezar o segundo termo do segundo membro da **Eq.(8)**, i.e.,

$$P_C >> P_B \Rightarrow P_{total} = P_C + P_B \approx P_C$$

ou equivalentemente, utilizando a **Eq.(9)**,

$$P_{total} \approx V_{CE} I_C \qquad (11)$$

A potência fornecida ao transistor é dissipada em forma de calor produzindo uma elevação de temperatura da estrutura semicondutora do componente.

Os valores máximos de temperatura de operação dos cristais de germânio e silício estão mostrados na **Tabela 1**. Acima dos limites de temperatura aí estabelecidos, as propriedades materiais dos cristais de Si e Ge sofrem alterações significativas desviando-os de suas características normais de operação.

Tabela 1 Temperaturas máximas de operação para os cristais de Si e Ge

Cristal	Temperatura máxima
silício	120 °C
germânio	90°C

Para evitar que as características elétricas do transistor sejam influenciadas pelo aquecimento excessivo do cristal semicondutor, a potência dissipada no transistor é limitada a um valor que permite o funcionamento normal do componente. Esse valor de potência é denominado de **potência de dissipação máxima** e representado pelo parâmetro $P_{C,máx.}$, sendo fornecido pelo fabricante nos folhetos de especificações do componente.

Potência de dissipação máxima é o valor máximo de potência que pode ser fornecida ao transistor sem que este sofra desvios significativos de suas características elétricas ou danos por sobreaquecimento.

FATORES QUE INFLUENCIAM NA DISSIPAÇÃO MÁXIMA

A potência de dissipação máxima de um transistor é influenciada pela resistência térmica do encapsulamento e pela temperatura externa, conforme discutido a seguir.

Resistência térmica do encapsulamento

A resistência térmica é um parâmetro que determina a oposição apresentada por um material ao fluxo de calor. Dessa forma bons condutores térmicos são aqueles materiais que exibem uma baixa resistência térmica e nos quais o calor pode ser transmitido mais rapidamente.

No caso do transistor, a resistência térmica do encapsulamento determina a rapidez com que o calor gerado internamente é escoado para o meio ambiente, conforme ilustrado na **Fig.3**

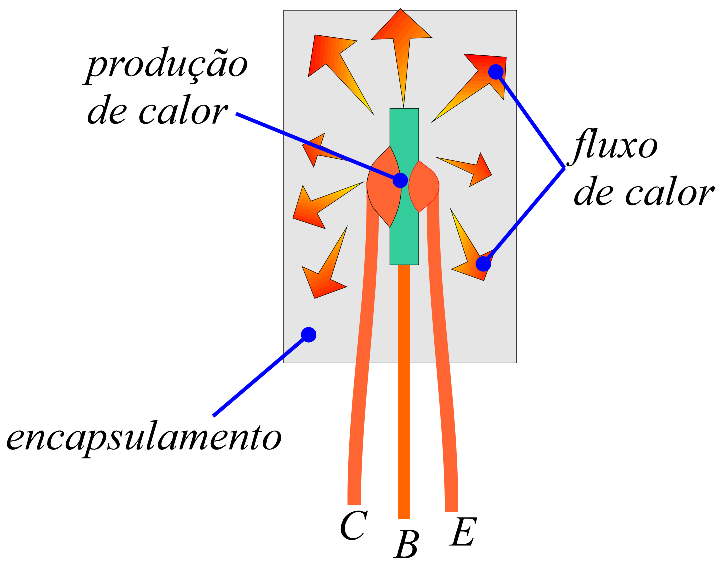


Fig.3 Fluxo de calor através do encapsulamento de um transistor.

Os transistores fabricados com capacidade de dissipação elevada, denominados de transistores de potência, são normalmente encapsulados em invólucros metálicos, como ilustrado na **Fig.4**. Esse tipo de componente é afixado em uma superfície metálica que aumenta a eficiência da dissipação de calor para o meio ambiente.

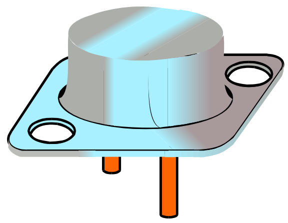


Fig.4 Encapsulamento de um transistor de potência.

Os transistores de baixa dissipação, geralmente denominados de transistores de sinal, são encapsulados em invólucros plásticos, na forma ilustrada na **Fig.5**.

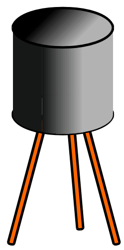


Fig.5 Transistor com encapsulamento de plástico.

Temperatura externa

O fluxo de calor através de um material também depende da diferença de temperatura entre as paredes do material, conforme ilustrado na **Fig.6**.

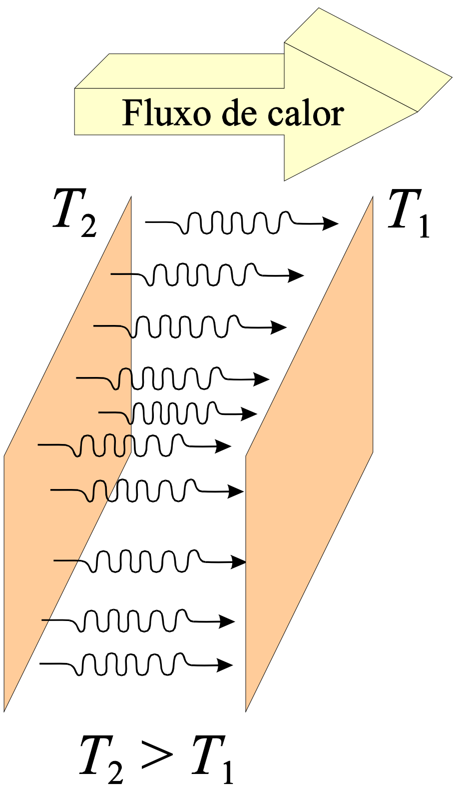


Fig.6 Fluxo de calor entre as paredes de um material.

Para que haja transmissão de calor, as duas superfícies devem exibir temperaturas distintas e nessas condições o calor flui da parede de temperatura mais alta para aquela de temperatura mais baixa.

Quanto maior for a diferença de temperatura entre paredes, tanto maior será o fluxo de calor. Isso explica por exemplo, por que uma xícara de café esfria mais rapidamente no inverno do que no verão.

Esse conceito aplicado ao transistor pode ser posto de acordo com a seguinte afirmativa:

O fluxo de calor entre o transistor e o meio ambiente depende da diferença entre a temperatura interna do transistor e a temperatura do ambiente externo.

Dessa forma, quanto mais baixa for a temperatura do ambiente externo, tanto mais rapidamente se dará o escoamento do calor gerado no componente, diminuindo assim o seu aquecimento.

Assim, dois transistores trabalhando com tensões e correntes idênticas poderão aquecer diferentemente se estiverem operando em ambientes de temperaturas distintas.

Devido à influência da temperatura na transmissão de calor, a especificação de potência máxima de dissipação é feita para uma dada temperatura.

Por exemplo, o folheto de especificações técnicas do transistor BC547 fornece um valor para a potência máxima de dissipação de 500 mW a uma temperatura de no máximo 25 °C. Esse valor de temperatura é geralmente adotado como padrão nos folhetos de especificações de transistores e outros componentes.

VARIAÇÃO DA POTÊNCIA DE DISSIPAÇÃO MÁXIMA COM A TEMPERATURA

Em muitas ocasiões faz-se necessário utilizar transistores em circuitos que irão funcionar a temperaturas superiores ao valor padrão de 25ºC. Nessas situações é necessário considerar que o valor de potência de dissipação máxima especificado a 25 °C não pode ser empregado.

Para que o transistor possa ser utilizado a uma temperatura ambiente superior ao valor padrão de 25 °C, os fabricantes fornecem, no folheto de especificações do componente, um gráfico da potência de dissipação máxima como função da temperatura ambiente. O gráfico mostrado na **Fig.7**, por exemplo, é representativo das condições de operação dos transistores BC546, 547 e 548. O emprego do gráfico na determinação da potência de dissipação máxima é ilustrado no exemplo a seguir.

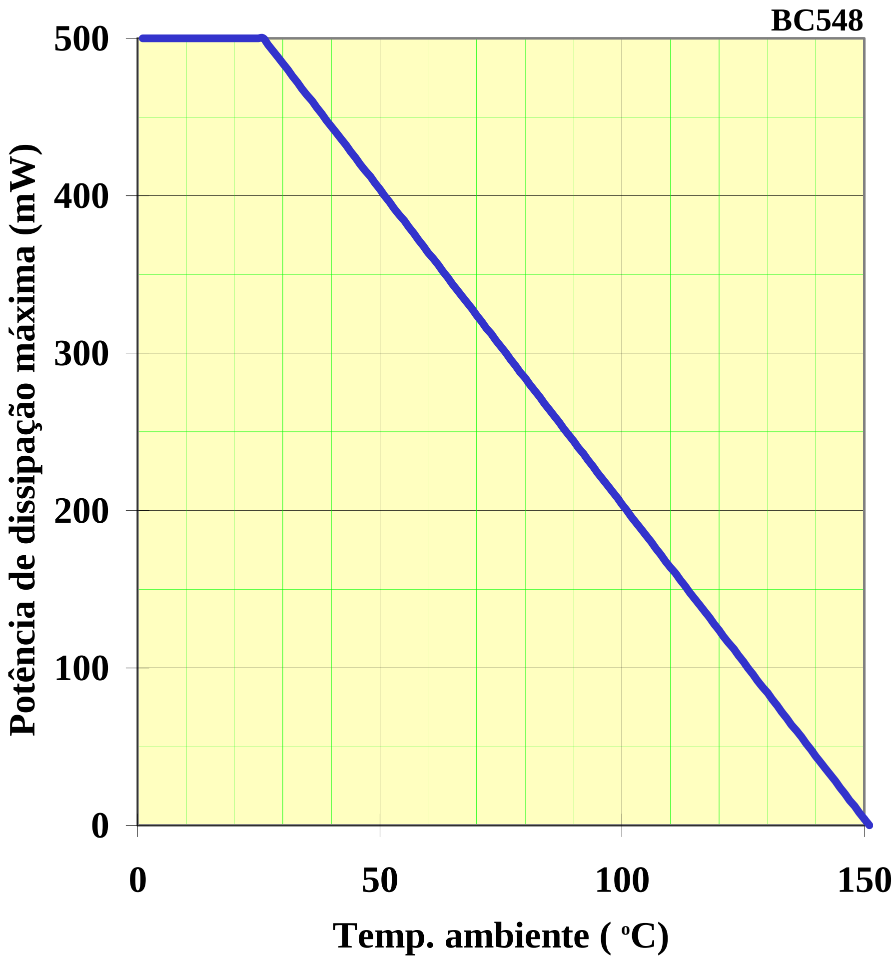


Fig.7 Potência de dissipação máxima como função da temperatura ambiente para o transistor BC548.

<u>Exemplo 1:</u> Determinar a potência de dissipação máxima para o transistor BC548 para operação a uma temperatura ambiente de 50 °C.

No gráfico da **Fig.8**, seleciona-se no eixo horizontal o valor de 50°C para a temperatura ambiente. A interseção com a curva, da linha vertical traçada a partir desse valor de temperatura, define o valor de 400 mW para a potência de dissipação máxima.

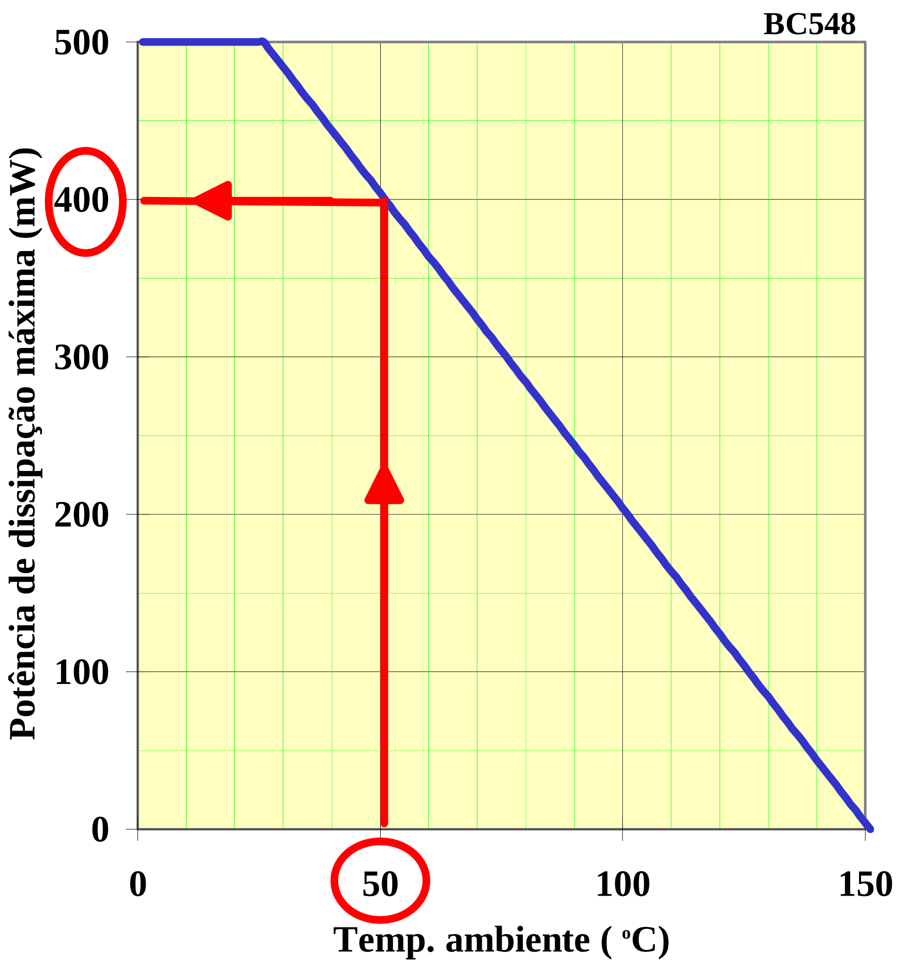


Fig.8 Determinação gráfica da potência de dissipação máxima para o **Exemplo 1**.

Correntes de fuga no transistor

Os transistores são fabricados com materiais semicondutores do tipo *p* e do tipo *n*. Esses materiais sofrem um processo de purificação e dopagem que permite obter a predominância de um tipo de portador.

Assim, qualquer cristal semicondutor do tipo *p* apresenta uma grande quantidade de lacunas e apenas uma pequena quantidade de elétrons livres. Nesses materiais, as lacunas são denominadas de **portadores majoritários** e os elétrons de **portadores minoritários**, conforme ilustrado na **Fig.9a.**

Semelhantemente, em um semicondutor tipo *n*, existe uma grande predominância de elétrons livres em comparação com as lacunas, conforme mostrado na **Fig.9b**. Nesses materiais, os elétrons livres são os portadores majoritários e as lacunas, os minoritários.

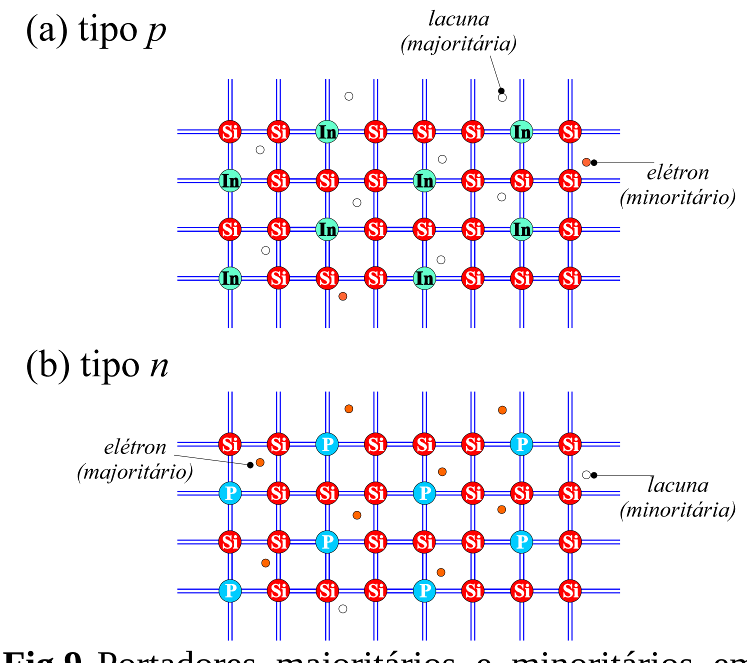


Fig.9 Portadores majoritários e minoritários em um semicondutor:**(a)** tipo *p*, **(b)** tipo *n*.

MOVIMENTO DOS PORTADORES MINORITÁRIOS

Os portadores minoritários sofrem a influência das tensões externas aplicadas ao componente semicondutor, movimentando-se no interior da estrutura cristalina.

O movimento de portadores minoritários através de uma junção *pn* só é importante quando esta fica submetida a uma polarização inversa. Como pode ser observado na **Fig.10**, o potencial inversamente aplicado favorece a injeção dos portadores minoritários através da junção, dando origem a uma pequena corrente de fuga.

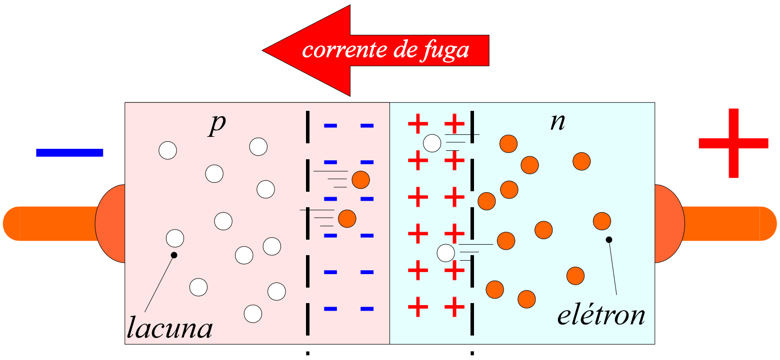


Fig.10 Movimento de portadores minoritários em uma junção *pn* inversamente polarizada.

Nos transistores o movimento dos portadores minoritários é importante apenas na junção base-coletor visto que essa junção permanece inversamente polarizada nas condições normais de operação do componente.

CORRENTE DE COLETOR COM EMISSOR EM ABERTO

A injeção dos portadores minoritários através da junção base-coletor, inversamente polarizada, dá origem a uma pequena corrente de fuga entre base e coletor.

Com o emissor em aberto, na configuração mostrada na **Fig.11**, essa corrente de fuga assume um valor próximo daquele obtido para um diodo inversamente polarizado. Para o

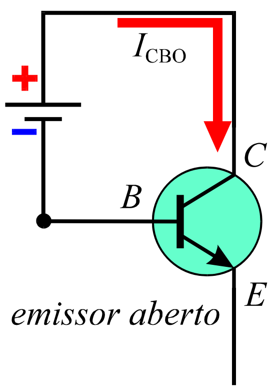


Fig.11 Transistor com emissor em aberto.

transistor, essa corrente é denominada de **corrente de coletor com emissor em aberto**, sendo representada pelo parâmetro I_{CBO}.

Com o emissor em aberto tem-se $I_E = 0$ e da **Eq.(7)** resulta

$$I_B = -I_C \qquad (12)$$

e da definição do parâmetro I_{CBO}, obtém-se

$$I_E = 0 \Rightarrow \begin{cases} I_C = I_{CBO} \\ I_B = -I_{CBO} \end{cases} \qquad (13)$$

CORRENTE DE COLETOR COM BASE EM ABERTO

Um segundo parâmetro de importância na avaliação dos efeitos das correntes de fuga em um transistor é a **corrente de coletor com base em aberto**, representada pelo parâmetro I_{CEO}.

Como mostrado na **Fig.12**, com a base em aberto tem-se $I_B = 0$ e da **Eq.(7)** resulta

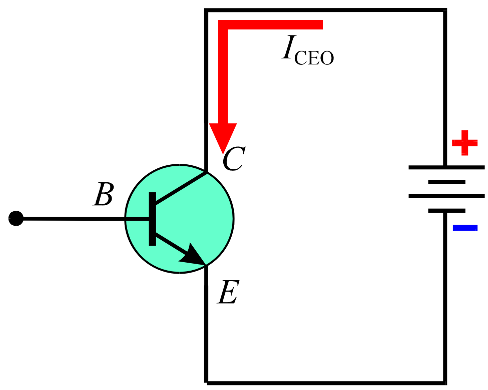


Fig.12 Transistor com base em aberto.

$$I_E = -I_C \qquad (14)$$

e da definição do parâmetro I_{CEO}, obtém-se

$$I_B = 0 \Rightarrow \begin{cases} I_C = I_{CEO} \\ I_E = -I_{CEO} \end{cases} \qquad (15)$$

CORREÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE AS CORRENTES NO TRANSISTOR

Como discutido em fascículos anteriores, o ganho de corrente do transistor em operação na região ativa permite obter a corrente de coletor diretamente da corrente de base, a partir da expressão

$$I_C = \beta I_B \tag{16}$$

No entanto a **Eq.(16)** prevê que a corrente de coletor se anula se a corrente de base também for nula. Conforme já discutido na seção anterior isso não ocorre pois com $I_B = 0$, flui uma pequena corrente I_{CEO} entre coletor e emissor.

Isso implica que a **Eq.(16)** foi obtida de forma aproximada sob a hipótese de o transistor operar na região ativa. No entanto, deve-se introduzir uma modificação na **Eq.(16)** de forma a se poder prever o comportamento do transistor quando a corrente de base tende a diminuir até um valor nulo. Essa modificação corresponde a uma simples adição do termo I_{CEO} ao segundo membro da **Eq.(16)** resultando em

$$I_C = \beta I_B + I_{CEO} \tag{17}$$

Assim, uma inspeção da **Eq.(17)** mostra que:

- $I_B = 0 \Rightarrow I_C = I_{CEO}$, conforme previsto pela **Eq.(15)**.
- Na região ativa, $\beta I_B >> I_{CEO} \Rightarrow I_C \approx \beta I_B$, conforme previsto pela **Eq.(16)**.

Como mencionado anteriormente, a corrente I_{CBO} é da ordem da corrente de saturação inversa obtida para um diodo comum. Surge então uma importante questão:

Qual a ordem de grandeza da corrente de fuga no coletor de um transistor? Ou alternativamente: Qual a relação entre a corrente de coletor com base em aberto, I_{CEO}, e aquela obtida com emissor em aberto, I_{CBO}?

A resposta a essa questão envolve uma análise mais detalhada que leva em conta todas as componentes de corrente do transistor e que permite demonstrar que a relação procurada é da forma

$$I_{CEO} = (\beta + 1) I_{CBO} \tag{18}$$

Como na região ativa, β ≈ 100, a **Eq.(18)** mostra uma diferença importante entre o valor da corrente de fuga no coletor de um transistor relativamente àquela em um diodo comum.

A corrente de fuga no coletor de um transistor é aproximadamente (β+1) vezes superior àquela observada em um diodo polarizado inversamente.

Na aproximação β >> 1, a **Eq.(18)** pode ser aproximada para

$$I_{CEO} \approx \beta I_{CBO} \qquad (19)$$

Inserindo a aproximação dada pela **Eq.(19)** na **Eq.(17)**, resulta

$$I_C = \beta(I_B + I_{CBO}) \qquad (20)$$

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA CORRENTE DE COLETOR

O aquecimento de um cristal semicondutor promove o rompimento de ligações covalentes, gerando portadores minoritários no cristal. No caso do transistor, o acréscimo de portadores minoritários com a temperatura aumenta a corrente de fuga no coletor.

A **Fig.13** apresenta um gráfico típico da dependência com a temperatura da corrente I_{CBO} para transistores de germânio e silício, em escala logarítmica.

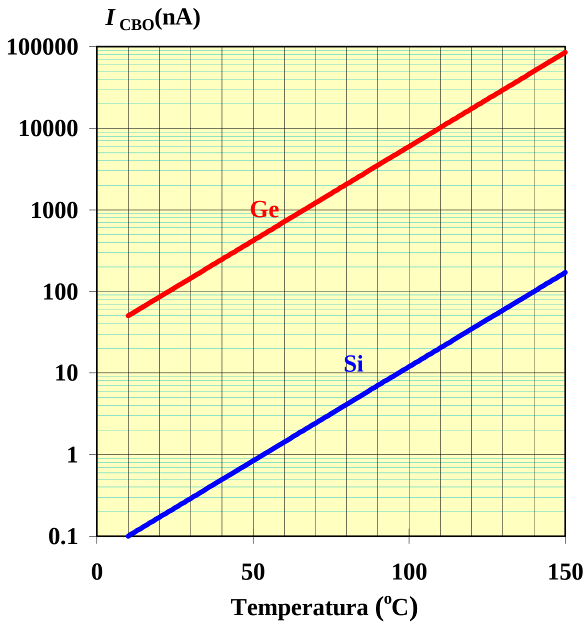


Fig.13 Dependência com a temperatura da corrente I_{CBO} para transistores de germânio e silício.

Como se pode observar na **Fig.13**, a corrente I_{CBO} dobra a cada 10 °C aproximadamente nos transistores de germânio e silício. Embora essa variação seja aproximadamente a mesma em

ambos os tipos de materiais, o parâmetro I_{CBO} é cerca de 500 vezes menor no transistor de silício relativamente ao de germânio. Daí a grande predominância de uso do silício na fabricação de transistores e outros dispositivos semicondutores.

DISPARO TÉRMICO

O **disparo térmico**, também denominado de **avalanche térmica**, é um fenômeno que ocorre no transistor devido à corrente de fuga e que pode levá-lo à destruição por superaquecimento. Como ilustrado na **Fig.14**, a seqüência de eventos que culminam com este fenômeno é a seguinte:

- A medida que o transistor funciona em um circuito eletrônico ocorre um aquecimento das junções como resultado da dissipação da potência elétrica

$$P_{\text{total}} \approx V_{\text{CE}} I_{\text{C}}$$

- O aquecimento aumenta a geração de portadores minoritários produzindo um acréscimo na corrente de fuga no coletor

$$I_{\text{CEO}} \approx \beta I_{\text{CBO}}$$

- Uma maior corrente de fuga provoca uma maior corrente de coletor

$$I_{\text{C}} = \beta I_{\text{B}} + I_{\text{CEO}} = \beta I_{\text{B}} + \beta I_{\text{CBO}}$$

- O acréscimo em I_{C} promove o aumento da potência dissipada no transistor

$$P_{\text{total}} \approx V_{\text{CE}} I_{\text{C}}$$

e o ciclo se repete, podendo levar a uma autodestruição do transistor.

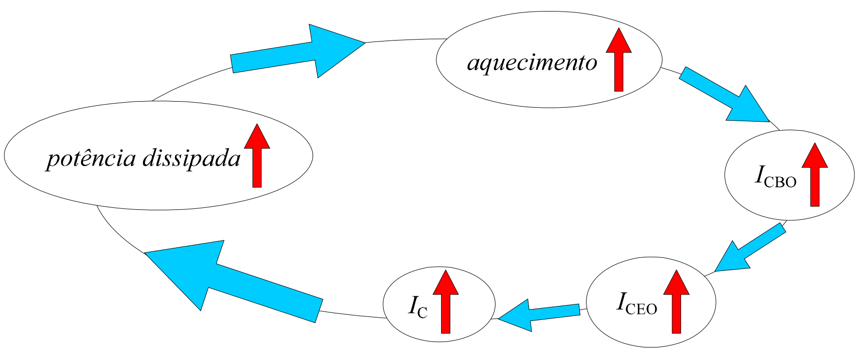


Fig.14 Representação do ciclo da avalanche térmica em um transistor.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Qual a potência dissipada em um transistor de silício *npn* submetido às condições elétricas: I_B = 20 μA, V_{BE} = 0,6 V, I_C = 2 mA e V_{CE} = 10 V?

2. O que é resistência térmica?

3. Quais os fatores que influenciam a potência dissipada em um transistor?

4. O que é potência de dissipação máxima de um transistor?

5. Determine a potência de dissipação máxima de um transistor BC548 operando a uma temperatura ambiente de 100 °C.

6. O que são portadores majoritários e minoritários em um cristal semicondutor?

7. Sob que polarização de uma junção *pn* se torna importante o movimento de portadores minoritários?

8. Defina os parâmetros I_{CB0} e I_{CE0}.

9. Por que a maioria de componentes semicondutores é fabricada com cristais de silício?

10. O que é disparo térmico e que conseqüência pode provocar em um transistor?

BIBLIOGRAFIA

CIPELLI, Antônio Marco Vicari & SANDRINI, Waldir João. Teoria e desenvolvimento de projetos de circuitos eletrônicos. 7. ed. São Paulo, Érica, 1983. 289p.

ELETRÔNICA MODULAR PANTEC. O transistor; princípios básicos. s.n.t. (curso básico, 4)

SENAI/DN. Transistores, Por Antônio Abel Correia Villela. Rio de Janeiro, Divisão de Recursos Humanos, 1977. 81p. (Publicações Técnicas, 7)

MILLMAN, Jacob e HALKIAS, Christos C., Integrated electronics: analog and digital circuits and systems, São Paulo, McGraw-Hill, 1972.

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Introdução

O comportamento de componentes eletrônicos fabricados com materiais semicondutores é geralmente expresso por curvas características, que são fornecidas pelo fabricante. Essas curvas características permitem obter a tensão entre terminais, dada a corrente através do componente ou vice-versa. Esse é o caso, por exemplo, da curva característica *VI* de um diodo semicondutor, que é um componente de dois terminais.

Sendo o transistor um componente de três terminais, e estando a ele associadas três correntes e tensões, a situação se torna um pouco mais complexa pois o número de curvas características aumenta, havendo portanto para cada par de terminais uma relação entre tensão e corrente que depende dos parâmetros elétricos impostos ao terceiro terminal.

O objetivo deste fascículo é apresentar ao leitor as curvas características do transistor e mostrar como essas curvas devem ser utilizadas para obtenção das condições de operação de circuitos transistorizados.

Para a boa compreensão do conteúdo e desenvolvimento das atividades contidas neste fascículo, o leitor deverá estar familiarizado com os conceitos relativos a:

- Transistor bipolar: princípio de operação.
- Transistor bipolar: relação entre parâmetros de circuito.

Configurações do transistor

Existem três possibilidades de configurar um transistor em um circuito. O nome dado a cada configuração é definido com base no terminal do transistor que é comum às duas malhas do circuito. Dessa forma, três configurações são possíveis:

- **Configuração emissor comum:** o terminal do emissor é comum às duas malhas do circuito, como mostrado na **Fig.1a**.
- **Configuração base comum:** o terminal da base do transistor é comum às duas malhas do circuito, como ilustrado na **Fig.1b**.
- **Configuração coletor comum:** o terminal do coletor é comum às duas malhas do circuito, como na **Fig.1c**.

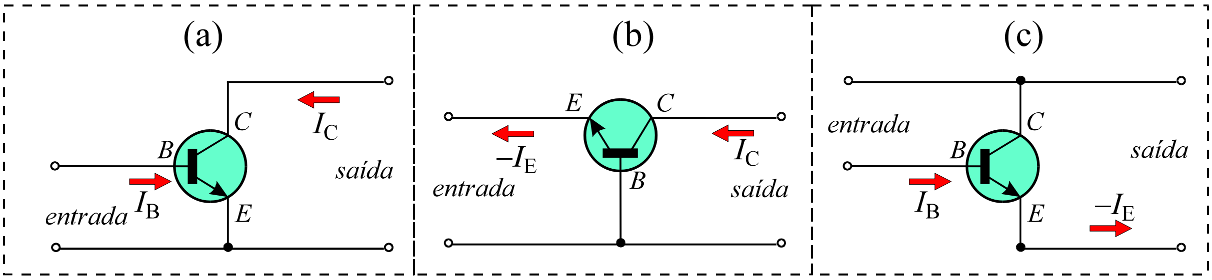


Fig.1 Configurações de um transistor em um circuito.

Curvas características

O comportamento de um componente eletrônico pode ser obtido aplicando-se uma tensão entre seus terminais, e medindo-se a corrente através do componente. Dessa forma geram-se pares de valores de corrente e de tensão que podem ser representados graficamente através da curva característica do dispositivo.

No diodo semicondutor, por exemplo, a corrente depende do valor e da polaridade da tensão aplicada aos seus terminais, conforme mostrado na **Fig.2**

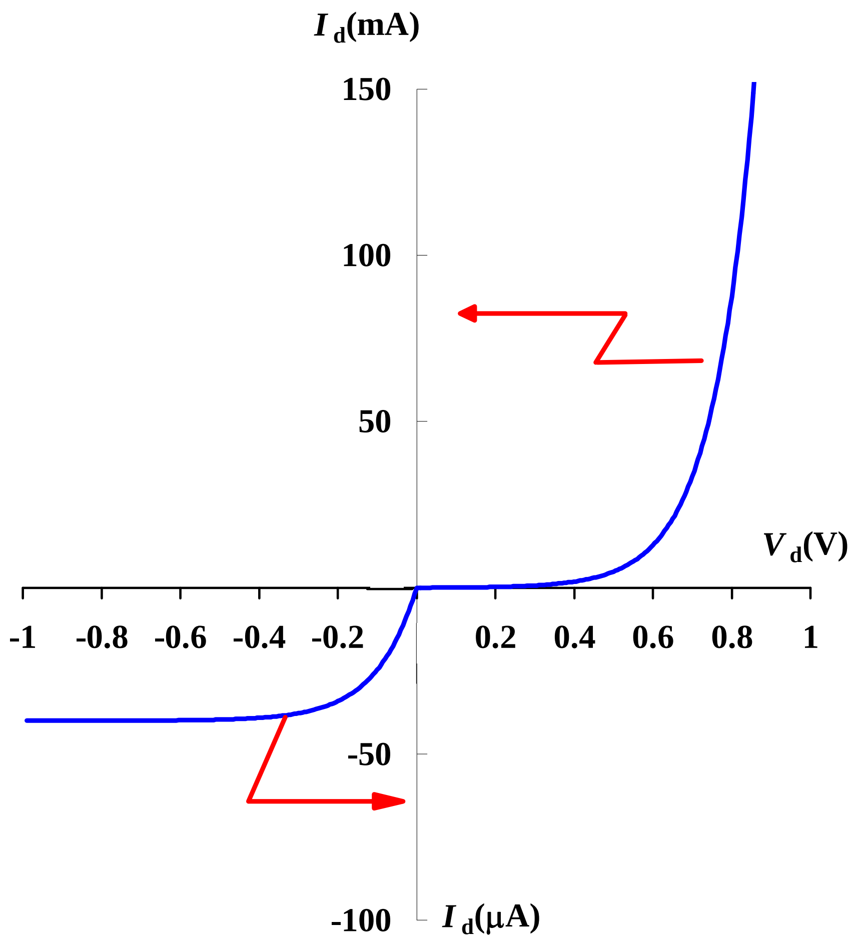


Fig.2 Curva característica de um diodo semicondutor.

O comportamento do transistor também é expresso através de curvas características. Estas são obtidas através de medidas elétricas sob condições controladas de tensão e de corrente.

O emprego das curvas características do transistor é de grande importância no projeto de circuitos, pois permite obter o comportamento do componente em uma ampla faixa de condições de operação.

PARÂMETROS DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS

Nos componentes semicondutores com apenas dois terminais, a tensão entre terminais e a corrente através do componente são utilizados na representação gráfica da curva característica.

Como o transistor é um componente de três terminais, cada par de terminais está associado a uma corrente e uma tensão. Dessa forma, podem-se em princípio utilizar os seis parâmetros definidos a seguir para representar as propriedades do transistor:

- I_B = corrente de base.
- I_C = corrente de coletor.
- I_E = corrente de emissor.
- V_{CB} = tensão coletor-base.
- V_{CE} = tensão coletor-emissor.
- V_{BE} = tensão base-emissor.

Os seis parâmetros representativos do transistor estão mostrados na **Fig.3**. Alguns desses parâmetros juntamente com outros não elétricos, tais como temperatura, podem ser utilizados em uma série de curvas características que expressam o comportamento do transistor nas mais diversas condições de operação.

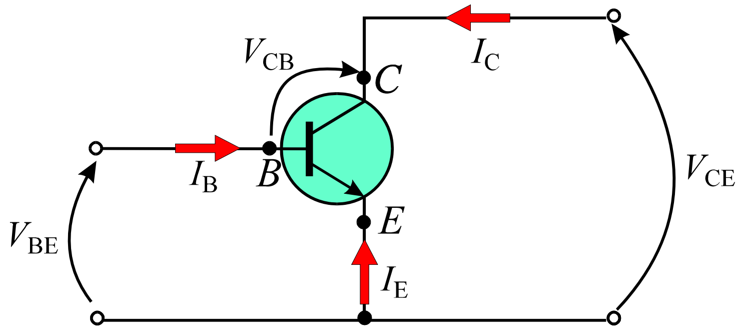


Fig.3 Parâmetros elétricos representativos do transistor.

CURVAS CARACTERÍSTICAS NA CONFIGURAÇÃO EMISSOR COMUM

O tipo de ligação mais utilizado em circuitos transistorizados é a configuração emissor comum, mostrada na **Fig.4**. As curvas características dos transistores, fornecidas pelos fabricantes, geralmente se referem a esse tipo de configuração.

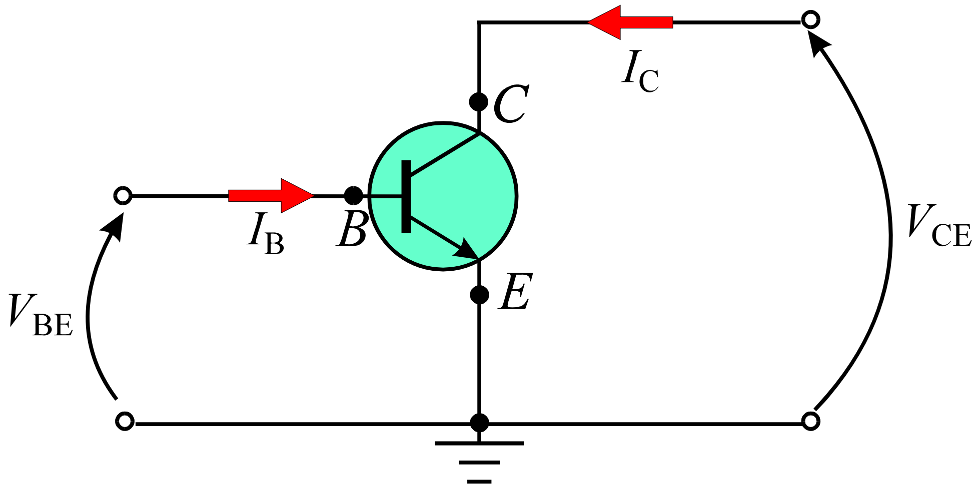


Fig.4 Configuração emissor comum.

Analisando a **Fig.4**, verifica-se que, na configuração emissor comum, apenas quatro parâmetros são suficientes para descrever o comportamento do transistor. Uma escolha possível corresponde aos parâmetros, V_{BE}, I_B, V_{CE} e I_C. Uma vez conhecidos esses quatro parâmetros os dois restantes podem ser obtidos utilizando as leis de Kirchhoff.

Com essa escolha, os parâmetros $\boldsymbol{V_{BE}}$ e $\boldsymbol{I_B}$ são denominados de **parâmetros de entrada** com $\boldsymbol{V_{CE}}$ e $\boldsymbol{I_C}$ representando os **parâmetros de saída**.

Portanto, para representar graficamente o comportamento do transistor na configuração emissor comum são necessários dois conjuntos de curvas características:

- Uma curva que expressa a relação entre os parâmetros de entrada, denominada de **curva característica de entrada**.

- Um conjunto de curvas que expressam as relações entre os parâmetros de saída, denominadas de **curvas características de saída**.

CURVAS CARACTERÍSTICAS DE SAÍDA

A influência da corrente de base na corrente de emissor torna maior a importância das curvas características de saída na representação das propriedades elétricas do transistor. Essas curvas características são também denominadas de **curvas características do coletor**.

Sabendo que para cada valor do parâmetro V_{CE} a corrente I_C é dependente do valor da corrente I_B, cada curva característica de saída é construída de forma a representar graficamente a relação entre I_C e V_{CE} para um determinado valor de I_B. A **Fig.5** mostra as curvas características de saída típicas de um transistor *npn*.

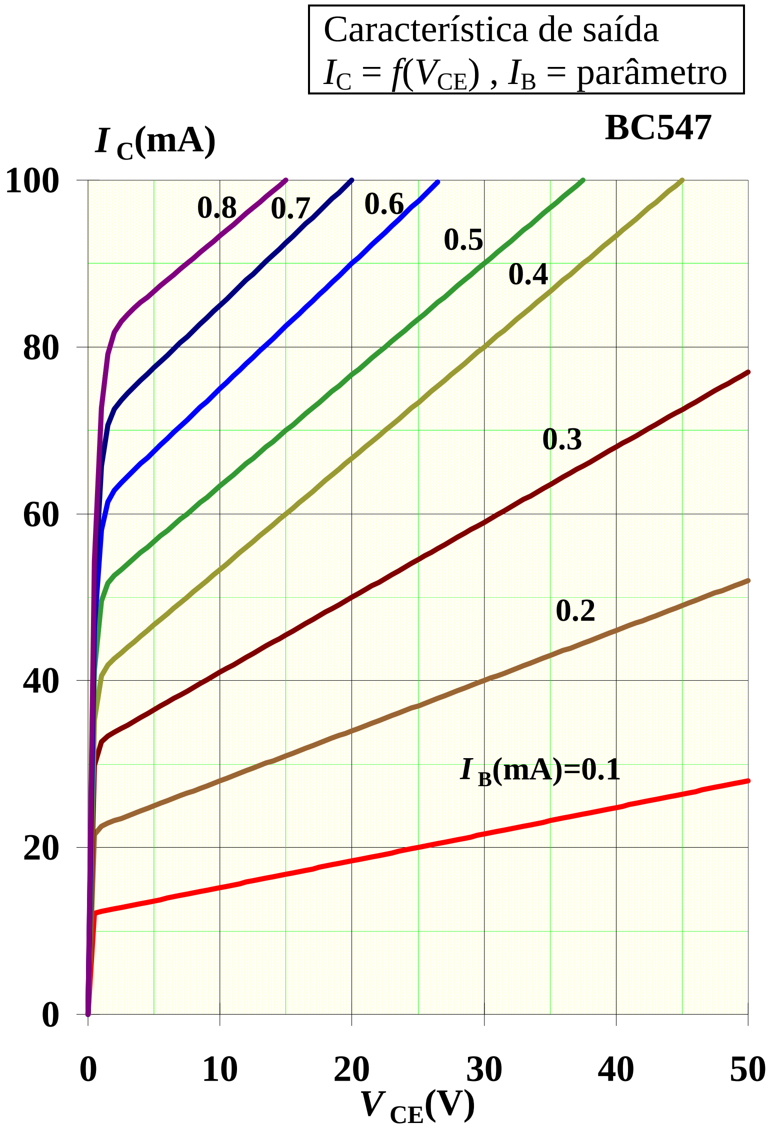


Fig.5 Curvas características de saída de um transistor *npn*.

Cada curva representada na **Fig.5** mostra a dependência da corrente de coletor I_C com a tensão coletor-emissor V_{CE}, para um determinado valor fixo da corrente de base. Em folhetos de especificações técnicas, o topo do gráfico indica que I_C é uma função de V_{CE} para cada valor fixo de I_B, através da representação:

$$I_C = f(V_{CE}) \text{ , } I_B = \text{parâmetro}$$

Deve-se observar que, de acordo com a convenção adotada para representação das correntes e tensões em um transistor, nos transistores *pnp* os parâmetros I_B, I_C e V_{CE} são negativos pois em condições normais de operação, o coletor é polarizado negativamente em relação ao emissor e as correntes de coletor e de base fluem dos terminais do transistor para as malhas do circuito, conforme mostrado na **Fig.6**.

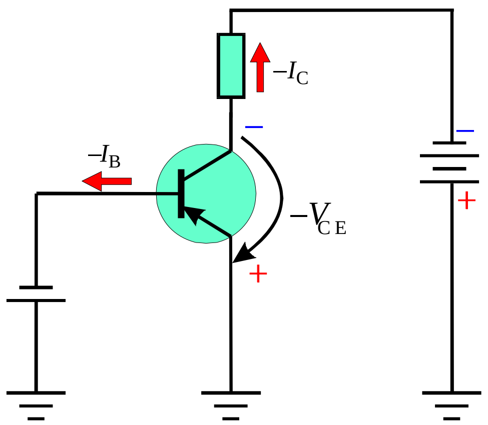


Fig.6 Polarizações e sentidos reais das correntes em um transistor *pnp*.

Dessa forma, as curvas características de saída para transistores *pnp* são representações gráficas de $(-I_C) \times (-V_{CE})$ para cada valor de $(-I_B)$, como mostrado na **Fig.7**.

Outro aspecto de importância no que se refere às curvas características fornecidas pelos fabricantes é que essas curvas representam o comportamento médio de um grande número de transistores de mesma especificação. Isso significa que, na prática, as propriedades elétricas do componente podem apresentar pequenos desvios em relação ao comportamento previsto pelas curvas características.

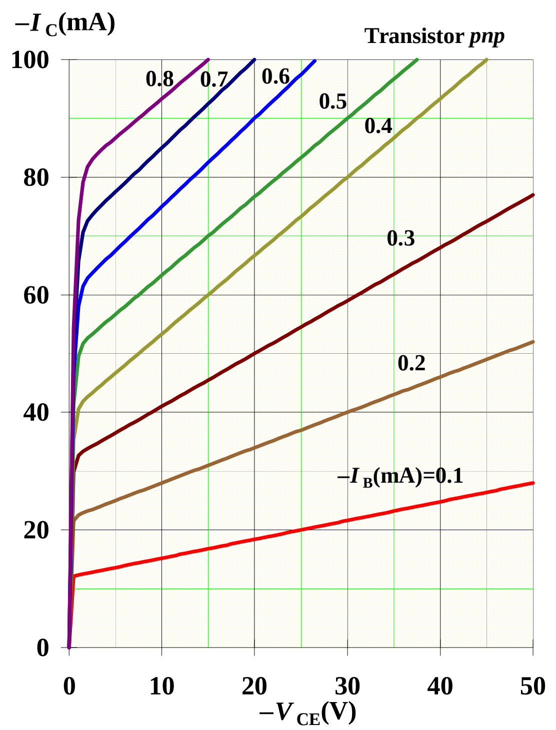


Fig.7 Curvas características de saída de um transistor *pnp*.

As curvas características fornecidas pelo fabricante representam o comportamento médio de um grupo de componentes de mesma especificação.

UTILIZAÇÃO DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE SAÍDA

Com o uso das curvas características é possível determinar as condições de operação de um transistor em um circuito. Isso é feito utilizando-se o conceito de **reta de carga**, examinado a seguir.

Reta de carga

Para o caso de um transistor *npn* conectado ao circuito mostrado na **Fig.8**, aplicando-se a 2[a]. Lei de Kirchhoff à malha de coletor tem-se que

$$V_{CC} = V_{CE} + R_C I_C \qquad (1)$$

ou alternativamente

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C \qquad (2)$$

Para valores fixos dos parâmetros V_{CC} e R_C, a **Eq.(2)** representa uma relação linear entre a tensão coletor-emissor V_{CE} e a corrente de coletor I_C.

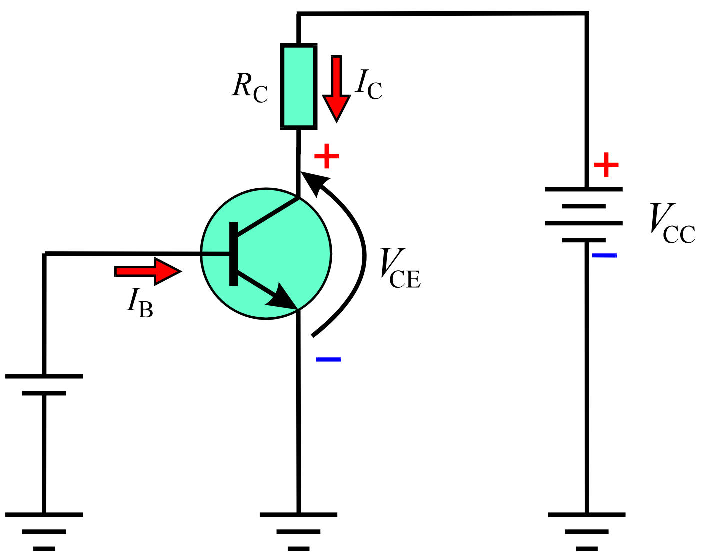


Fig.8 Circuito com transistor *npn* na configuração emissor comum.

A relação entre V_{CE} e I_C expressa pela **Eq.(2)** é representada graficamente por um segmento de reta em um diagrama $I_C{\times}V_{CE}$. Esse segmento de reta, denominado de **reta de carga**, pode ser traçado conhecendo-se apenas dois de seus pontos. Estes são obtidos diretamente da **Eq.(2)**, observando-se que:

- **Interseção com o eixo horizontal** $\Rightarrow I_C = 0 \Rightarrow V_{CE} = V_{CC}$.
- **Interseção com o eixo vertical** $\Rightarrow V_{CE} = 0 \Rightarrow I_C = \dfrac{V_{CC}}{R_C}$.

A **Fig.9** mostra a representação gráfica da reta de carga prevista pela **Eq.(2)**, e que corresponde à linha traçada entre os pontos de interseção com os dois eixos do gráfico.

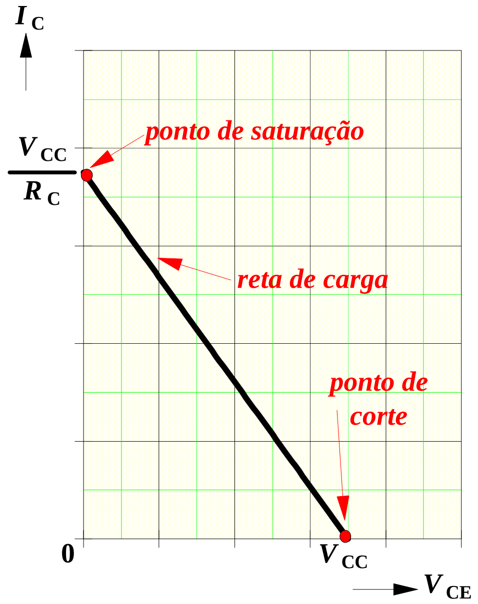


Fig.9 Reta de carga representada no diagrama $I_C \times V_{CE}$.

Para o circuito da **Fig.8**, duas condições de operação definem os pontos de interseção da reta de carga com os eixos na **Fig.9**:

- **Condição de corte**.
- **Condição de saturação**.

<u>Condição de corte</u>

A condição de corte ocorre quando a corrente de base no transistor é nula. A partir da relação entre correntes já derivada anteriormente,

$$I_C = \beta I_B + (\beta + 1) I_{CBO} \tag{3}$$

Desprezando-se a corrente de fuga no coletor, a condição I_B=0 fornece I_C=0 que define o **ponto de corte** mostrado na **Fig.9**.

Condição de saturação

A condição de saturação ocorre quando a corrente de base é suficientemente alta de forma a anular a tensão coletor-emissor. Dessa forma, impondo V_{CE} = 0 na **Eq.(2)** resulta $I_C = \frac{V_{CC}}{R_C}$, que corresponde ao **ponto de saturação** mostrado na **Fig.9**. Essa situação equivale à existência de um curto entre os terminais do coletor e do emissor no circuito da **Fig.8**, de forma que toda a tensão da fonte de alimentação se transfere diretamente para o resistor de coletor.

Ponto de operação

Uma vez traçada a reta de carga pode-se determinar graficamente os valores de V_{CE} e de I_C, para um dado valor da corrente de base I_B na configuração emissor comum.

O procedimento gráfico pode ser descrito com base no circuito mostrado na **Fig.10a**, onde admite-se que a corrente de base esteja estabelecida em um valor $I_B = I_{BQ}$. A **Fig.10b** mostra as curvas características de saída que incluem aquela referente ao valor $I_B = I_{BQ}$.

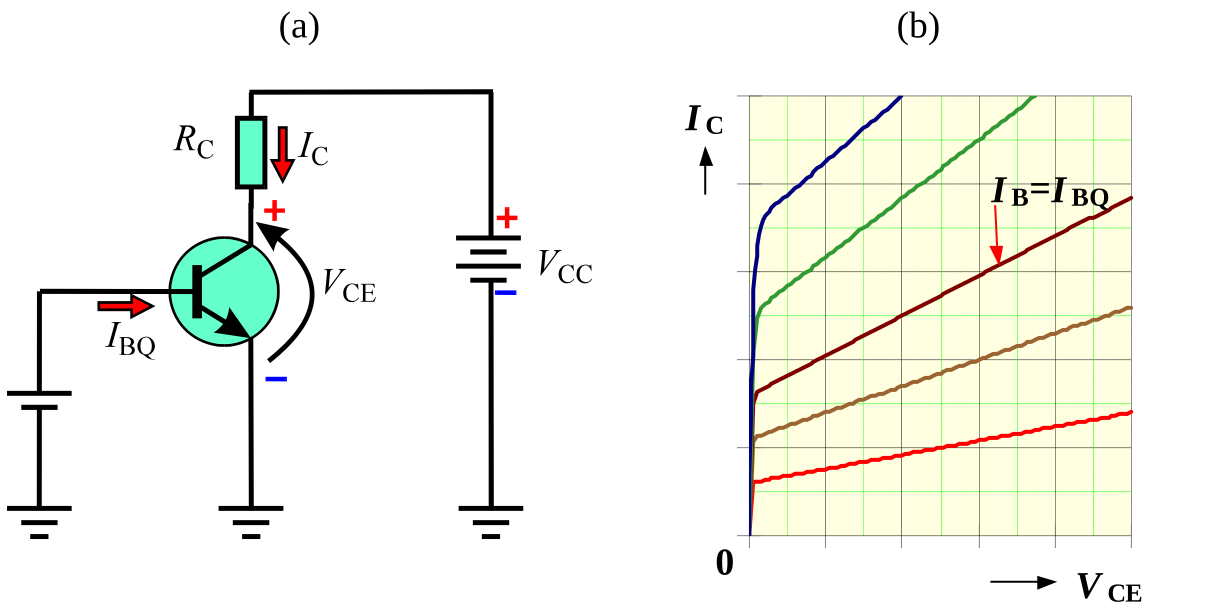


Fig.10 Circuito e curvas características de saída de um circuito transistorizado na configuração emissor comum.

Como se pode verificar na **Fig.10b**, qualquer ponto sobre a curva característica pode ser utilizado para representar os valores da corrente de coletor e da tensão coletor-emissor no circuito da **Fig.10a**. A questão portanto a se considerar é a seguinte:

Conhecidos os valores de V_{CC} e R_C no circuito da Fig.10a, quais são os valores resultantes da corrente de coletor e da tensão coletor-emissor?

A resposta a essa questão só pode ser obtida se for utilizada mais uma informação. Esta informação adicional é fornecida pela reta de carga do circuito, incorporada ao gráfico das características de saída, conforme ilustrado na **Fig.11**.

Ou seja, da mesma forma que os valores de corrente e tensão para o circuito definem algum ponto na curva característica, a solução deve também estar em algum ponto da reta de carga. Só existe portanto um ponto que pode existir simultaneamente na reta de carga e na curva característica correspondente a uma corrente de base I_{BQ}. Esse ponto, mostrado na **Fig.11,** é o **ponto de operação ou ponto quiescente *Q***.

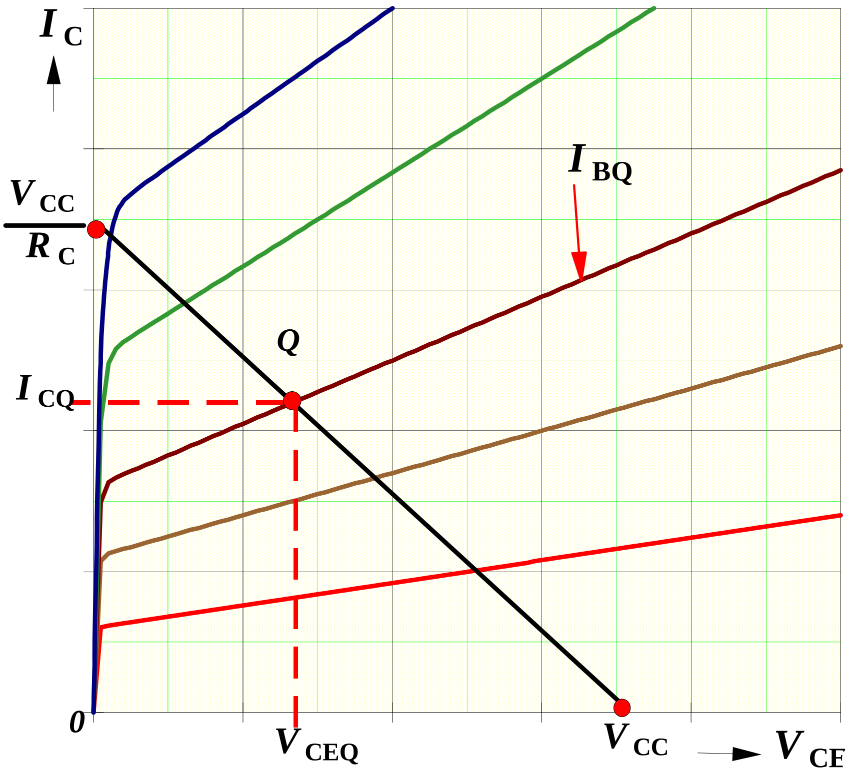


Fig.11 Determinação gráfica do ponto quiescente de um circuito transistorizado.

Determinado o ponto quiescente do circuito, obtêm-se diretamente do gráfico os valores quiescentes da corrente de coletor e da tensão coletor-emissor,

representados pelos parâmetros I_{CQ} e V_{CEQ}, respectivamente. A queda de tensão sobre o resistor de coletor no ponto quiescente fica assim determinada pela expressão

$$V_{RcQ} = V_{CC} - V_{CEQ} \tag{4}$$

O exemplo seguinte ilustra o cálculo numérico do ponto quiescente de um circuito transistorizado.

<u>**Exemplo1:**</u> O circuito mostrado na **Fig.12** utiliza um transistor BC146. Para uma corrente de base de 100μA determinar os parâmetros I_C, V_{CE} e V_{Rc}.

As curvas características do transistor BC146 estão representadas no gráfico da **Fig.12(b)**, juntamente com a reta de carga do circuito. A interseção da reta de carga com a curva correspondente a uma corrente de base de 100 μA ocorre no ponto quiescente *Q*. Como pode ser aí observado, os valores de corrente e tensão são,

$$I_{CQ} = 22 \text{ mA}, \; V_{CEQ} = 3{,}4 \text{ V}$$

A tensão no resistor de coletor é obtida da **Eq.(4)**, resultando em

$$V_{RcQ} = 6 - 3{,}4 = 2{,}6 \text{ V}$$

(a) (b)

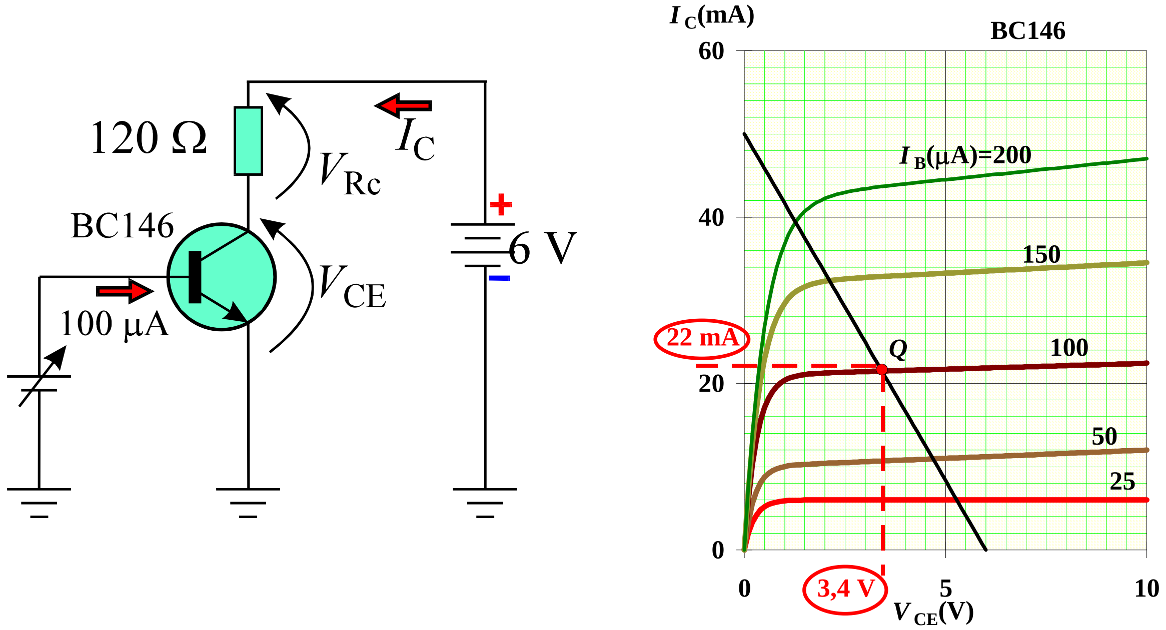


Fig.12 **(a)** Circuito transistorizado referente ao **Exemplo 1**. **(b)** Curvas características do transistor BC146 e reta de carga do circuito.

CURVA DE DISSIPAÇÃO MÁXIMA

Utilizando o valor da potência de dissipação máxima do transistor, pode-se definir, no diagrama das curvas características de saída, as faixas de valores de corrente de coletor e de tensão coletor-emissor que assegurem a operação do transistor dentro de seus limites de dissipação de potência.

Como já discutido no fascículo anterior, a potência de dissipação máxima do transistor é dada aproximadamente pela expressão

$$P_{C,máx} = V_{CE} I_C \qquad (5)$$

A relação dada pela **Eq.(5)** pode também ser escrita na forma

$$I_C = \frac{P_{C,máx}}{V_{CE}} \qquad (6)$$

A **Eq.(6)** estabelece a dependência da corrente de coletor com a tensão coletor-emissor para um dado valor da potência de dissipação máxima. Dessa forma, conhecido o valor de $P_{C,máx}$, fornecido pelo fabricante, e atribuindo-se valores ao parâmetro V_{CE}, os valores correspondentes de I_C podem ser calculados da **Eq.(6)**.

Por exemplo, considerando o caso do transistor BC547 com a especificação $P_{C,máx}$ = 500mW a 25ºC, tem-se

$$I_C = \frac{0{,}5\ \text{W}}{V_{CE}} \qquad (7)$$

Utilizando o conjunto de valores de V_{CE} listados na 2ª. coluna da **Tabela 1**, obtêm-se os valores de I_C da 3ª. coluna daquela tabela.

Tabela 1 Alguns valores de V_{CE} e I_C correspondentes à dissipação máxima de 500 mW no transistor BC547.

Ponto	V_{CE}	I_C
1	5 V	0,1A = 100 mA
2	10 V	0,05 A = 50 mA
3	20 V	0,025 A = 25 mA
4	40 V	0,0125 A = 12,5 mA

Representando-se os quatro pontos no diagrama $I_C \times V_{CE}$, obtém-se o gráfico mostrado na **Fig.13**. A curva que passa pelos quatro pontos é a representação gráfica da relação entre os parâmetros I_C e V_{CE}, definida pela **Eq.(7)**.

A curva de dissipação máxima do transistor define o limite entre duas regiões, indicadas na **Fig.14**. A região localizada acima da curva de dissipação máxima representa a **região de dissipação excessiva** do transistor, pois os valores de V_{CE} e I_C naquela região fornecem uma potência de dissipação superior à potência de dissipação máxima do componente.

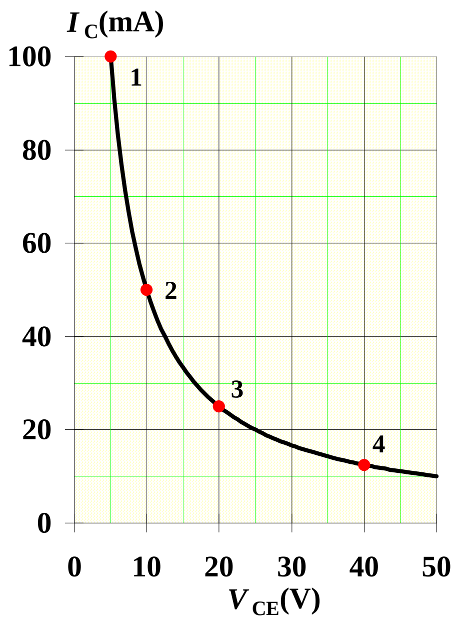


Fig.13 Representação gráfica da **Eq.(7)** para o transistor BC547.

A região abaixo da curva representa a **região de funcionamento normal** do componente, pois valores de V_{CE} e I_C no interior dessa região correspondem a uma potência de dissipação inferior à potência de dissipação máxima do transistor.

Para operação do componente a temperaturas diferentes de 25 °C, deve-se utilizar a potência de dissipação máxima na temperatura de trabalho para então calcular a curva de dissipação máxima a partir da **Eq.(6)**.

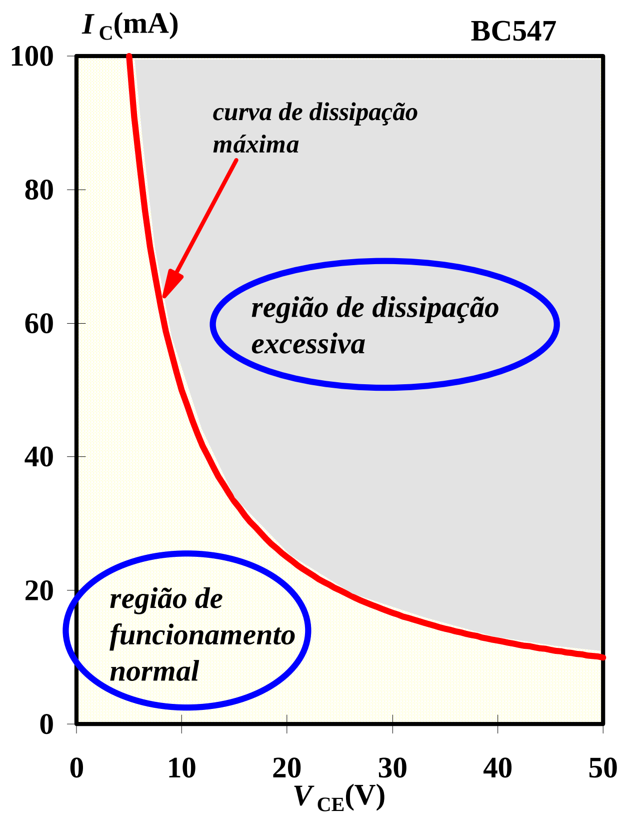


Fig.14 Regiões definindo o regime de operação do transistor BC547.

LIMITAÇÃO DA DISSIPAÇÃO DE POTÊNCIA SOBRE A RETA DE CARGA

A reta de carga expressa todas as possibilidades de funcionamento de um transistor para um determinado valor do resistor de coletor e da tensão de alimentação. Como a curva de dissipação máxima estabelece o limite da região de funcionamento normal do transistor, faz-se necessário que a reta de carga esteja sempre situada abaixo daquela curva.

A **Fig.15a** representa o trecho de um circuito alimentando um transistor *npn* BC547 na configuração emissor comum. Na **Fig.15b** está traçada a curva de dissipação máxima de 500 mW referente a uma temperatura de 25ºC. No mesmo gráfico estão representadas as retas de carga obtidas atribuindo-se para V_{CC} os valores de 40 V e 30 V, respectivamente, com R_C fixado em 500 Ω em ambos os casos.

(a) (b)

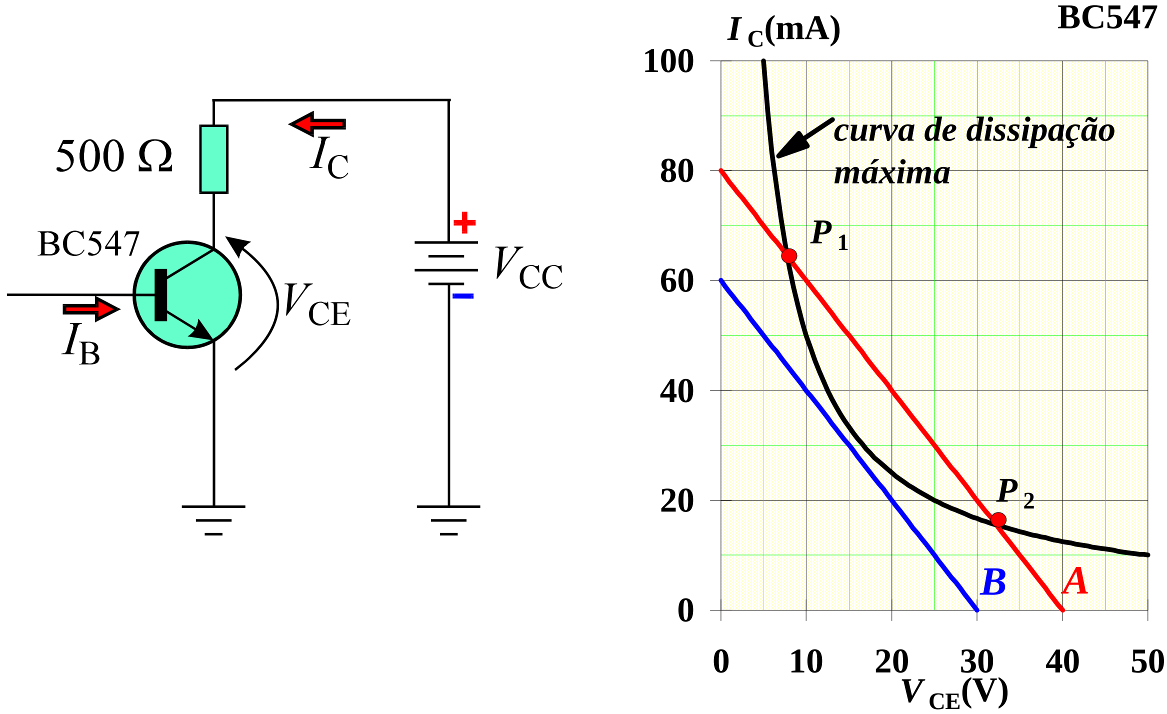


Fig.15 **(a)**Transistor na configuração emissor comum. **(b)**Curva de dissipação máxima e retas de carga: *A*(V_{CC}=40 V, R_C=500 Ω), *B* (V_{CC}=30 V, R_C=500 Ω).

Observa-se na **Fig.15b** que a reta de carga *B* está situada totalmente abaixo da curva de dissipação máxima do transistor. Dessa forma, qualquer

valor de corrente de base pode ser utilizado no circuito da **Fig.15a** sem que a potência de dissipação máxima do componente seja superada.

Por outro lado, examinando-se a reta de carga *A* da **Fig.15b**, observa-se que sobre o trecho entre os pontos P_1 e P_2 a potência dissipada supera o valor máximo definido pela curva de dissipação máxima do componente. Dessa forma, os parâmetros de circuito referentes à curva *A* não possibilitariam a operação segura do componente para um valor arbitrário da corrente de base.

Para evitar a possibilidade de dissipação excessiva de um transistor, os parâmetros de circuito devem ser escolhidos de forma que a reta de carga correspondente esteja situada totalmente abaixo da curva de dissipação máxima do componente.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Cite as configurações de um transistor em um circuito, caracterizando-as.

2. Para um transistor na configuração emissor comum, quais são os parâmetros de entrada e saída?

3. Para um transistor na configuração emissor comum, como são representadas as curvas características de saída?

4. O que é a reta de carga de um circuito transistorizado na configuração emissor comum?

5. Qual a denominação dos pontos de interseção da reta de carga com os eixos vertical e horizontal do diagrama $I_C \times V_{CE}$?

6. Para as condições estabelecidas no **Exemplo 1**, utilize o gráfico da **Fig.12b** para determinar:

   (a) I_C no ponto de saturação.

   (b) V_{CE} no ponto de corte.

7. Para operação segura de um transistor, qual deve ser a disposição da reta de carga com respeito à curva de dissipação máxima do transistor?

BIBLIOGRAFIA

CIPELLI, Antônio Marco Vicari & SANDRINI, Waldir João. Teoria e desenvolvimento de projetor de circuitos eletrônicos. 7ed. São Paulo, Erica, 1983. 580p.

ELETRÔNICA MODULAR PANTEC. O transistor; princípios básicos. s.n.t. (curso básico, 4).

SENAI/DN. Transistores, por Antônio Abel Correia Vilela. Rio de Janeiro; Divisão de Recursos Humanos, 1977. 81p. (Publicações Técnicas, 7).

MILLMAN, Jacob e HALKIAS, Christos C., Integrated electronics: analog and digital circuits and systems, São Paulo, McGraw-Hill, 1972.

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Introdução

As características de um circuito eletrônico transistorizado são dependentes da escolha adequada do ponto de operação do transistor, uma vez que um ponto quiescente mal selecionado pode levar a um mau desempenho do circuito.

Este fascículo tratará de um método simples de obtenção do ponto de operação de um circuito transistorizado, visando a capacitar o leitor a obter na prática o desempenho do circuito transistorizado, previsto através das curvas características.

Para a boa compreensão do conteúdo e desenvolvimento das atividades contidas neste fascículo, o leitor deverá estar familiarizado com os conceitos relativos a:

- Transistor bipolar: relação entre parâmetros de circuito.
- Transistor bipolar: ponto de operação.

Polarização de base por corrente constante

Denomina-se de **polarização de base** o processo de obtenção da corrente de base necessária para levar o transistor ao ponto de operação desejado. Entre os processos de polarização de base, o mais simples é o de polarização por corrente constante.

Através do traçado da reta de carga e da determinação do ponto de operação *Q* fica determinada a corrente de base quiescente I_{BQ}, conforme ilustrado na **Fig.1**.

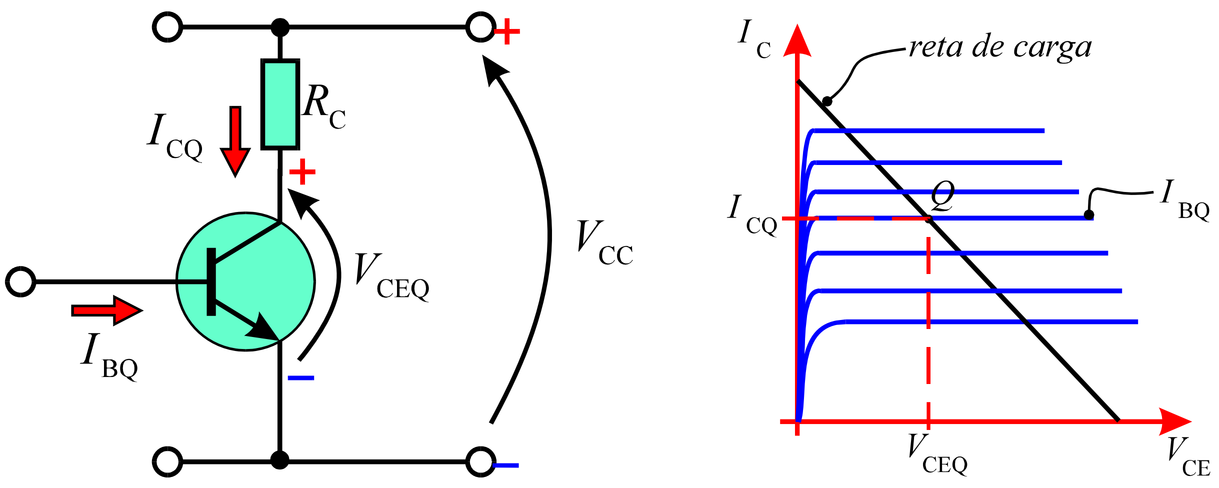


Fig.1 Determinação gráfica do ponto quiescente de um circuito transistorizado.

No método de polarização de base por corrente constante, a corrente de base quiescente I_{BQ} é obtida pelo uso de um **resistor de base**. Como mostrado na **Fig.2**, esse resistor é ligado entre a base e o terminal positivo da fonte de alimentação.

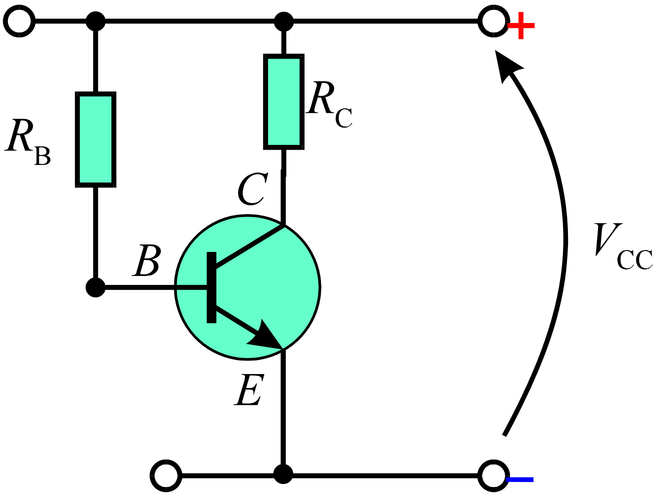


Fig.2 Emprego de um resistor para obtenção da corrente de base quiescente.

ANÁLISE DA MALHA DA BASE

Como mostrado na **Fig.3**, a **malha da base**, é composta pelo arranjo série do resistor de base R_B e da junção base-emissor, que se completa juntamente com a fonte de alimentação

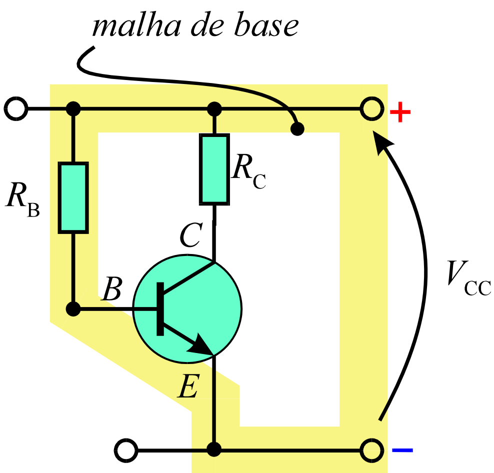


Fig.3 Malha da base de um transistor.

Considerando que a junção base-emissor do transistor se comporta como um diodo, o circuito equivalente da malha da base é aquele mostrado na **Fig.4**.

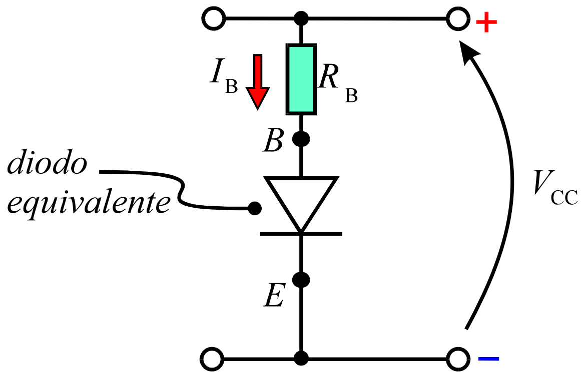


Fig.4 Circuito equivalente da malha da base do transistor.

Observando o circuito equivalente da **Fig.4**, verifica-se que o diodo representativo da junção base-emissor é polarizado diretamente, permitindo a circulação de corrente de base através do resistor.

DETERMINAÇÃO DO RESISTOR DE BASE

A corrente de base I_B depende dos seguintes parâmetros:

- Resistência R_B.
- Tensão de alimentação V_{CC}.
- Tipo de transistor.

Com base no circuito equivalente mostrado na **Fig.4**, a corrente de base quiescente é obtida da relação

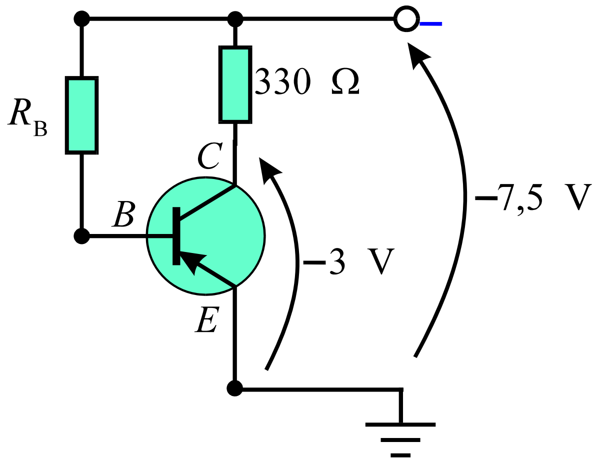
$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \quad (1)$$

Dessa forma, conhecidos os valores de I_{BQ}, da tensão de alimentação V_{CC} e da tensão base-emissor V_{BE}, a resistência R_B pode ser derivada da **Eq.(1)**, resultando em

$$R_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{I_{BQ}} \quad (2)$$

O exemplo a seguir ilustra o procedimento de determinação da resistência R_B.

Exemplo 1: Um transistor de silício BC200 é utilizado no circuito da **Fig.5a**. Com base na curva característica do componente mostrada na **Fig.5b**, determinar o valor de R_B necessário à obtenção de uma tensão coletor-emissor no ponto quiescente, $V_{CEQ} = -3V$.



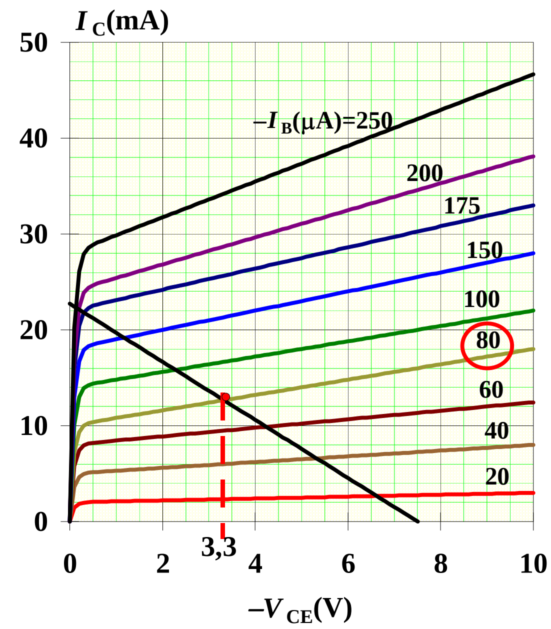


Fig.5 Circuito e curva característica para o **Exemplo 1**.

A reta de carga correspondente ao resistor R_C = 330 Ω mostrado na **Fig.5a** já está traçada na **Fig.5b**. A interseção dessa reta com a curva correspondente a $-I_B$ = 80μA, define um valor $-V_{CEQ} \approx 3{,}3$ V. Esse valor difere cerca de 10% do valor definido originalmente e pode ser considerado admissível para esse exemplo.

Utilizando na **Eq.(2)**, $-I_{BQ}$ = 0.08 mA e o valor $-V_{BE}$ = 0,6 V correspondente ao silício, obtém-se

$$R_B = \frac{-7{,}5-(-0{,}6)}{-0{,}08} = \frac{-6{,}9}{-0{,}08} = 86.250\,\Omega$$

Do resultado do **Exemplo 1**, observa-se que o resistor R_B é normalmente de resistência elevada pois as correntes de base em transistores são usualmente baixas.

Estabilidade térmica

A dependência com a temperatura da corrente de fuga I_{CBO} faz que a corrente de coletor seja também influenciada pela temperatura. Isso torna-se evidente a partir da expressão geral para a corrente de coletor

$$I_C = \beta\, I_B + (\beta + 1)\, I_{CBO} \qquad (3)$$

Essa dependência com a temperatura da corrente de coletor influencia a tensão sobre o resistor de coletor V_{Rc} e aquela entre coletor e emissor V_{CE}. Essa conclusão é obtida analisando-se as expressões para as tensões na malha do coletor do circuito mostrado na **Fig.6**

$$V_{Rc} = R_C\, I_C \qquad (4)$$

$$V_{CE} = V_{CC} - V_{Rc} \qquad (5)$$

A **Eq.(4)** mostra que variações na corrente de coletor devido a flutuações de temperatura produzem variações em V_{Rc}. Essas variações também alteram o valor de V_{CE}, como se pode concluir a partir da **Eq.(5)**.

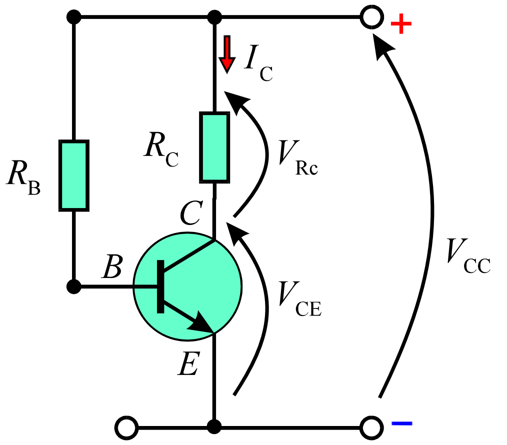


Fig.6 Circuito transistorizado na configuração emissor comum.

A influência da temperatura na localização do ponto de operação do circuito transistorizado pode ser resumida da seguinte forma:

- **Acréscimo de temperatura:** O ponto de operação se desloca sobre a reta de carga no sentido de correntes crescentes e tensões decrescentes, como mostrado na **Fig.7a**.

- **Decréscimo de temperatura:** O ponto de operação se desloca sobre a reta de carga no sentido de correntes decrescentes e tensões crescentes, como mostrado na **Fig.7b**.

(a) Acréscimo na temperatura (b) Decréscimo na temperatura

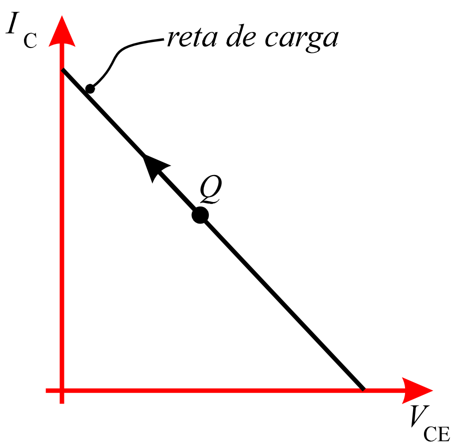


Fig.7 Influência da temperatura na localização do ponto de operação de um circuito transistorizado.

O grau de influência da temperatura sobre o ponto de operação de um circuito transistorizado pode ser caracterizado a partir do **fator de estabilidade** definido a seguir.

FATOR DE ESTABILIDADE

O fator de estabilidade S é um coeficiente utilizado para avaliar o grau de estabilidade térmica de um estágio transistorizado. Este fator é definido pela relação

$$S = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_{CBO}} \qquad (6)$$

onde:

- ΔI_{CBO} = variação na corrente de fuga I_{CBO} causada pela variação de temperatura.

- ΔI_C = variação na corrente de coletor I_C causada pela variação com a temperatura da corrente de fuga I_{CBO}.

Um estágio transistorizado terá melhor estabilidade térmica quanto menor for a variação ΔI_C para uma dada variação ΔI_{CBO} na corrente de fuga. Dessa forma, a **Eq.(6)** permite estabelecer:

A estabilidade térmica de um estágio transistorizado será tanto melhor quanto menor for o valor do fator de estabilidade térmica S.

Como descrito a seguir, a estabilidade térmica depende fundamentalmente do tipo de aplicação a que se destina o circuito transistorizado.

ESTABILIDADE TÉRMICA COM CORRENTE DE BASE CONSTANTE

O fator de estabilidade para este método de polarização pode ser obtido determinando a variação ΔI_C devido a uma variação ΔI_{CBO} no segundo membro da **Eq.(3)**. Impondo que I_B seja constante na **Eq.(3)**, o que equivale a uma variação $\Delta I_B = 0$, obtém-se

$$\Delta I_C = (\beta + 1)\,\Delta I_{CBO}$$

Essa relação permite obter o fator de estabilidade com uso da **Eq.(6)** resultando em

$$S = \beta + 1 \qquad (7)$$

Da **Eq.(7)** nota-se que quanto maior for o ganho de corrente do transistor, maior será o valor de S o que implica pior estabilidade térmica do circuito. Portanto, o método de polarização por corrente de base constante deve ser evitado em circuitos que estejam sujeitos a grandes variações de temperatura.

CORREÇÃO NO PONTO DE OPERAÇÃO

Devido a diferenças em processos de fabricação, os transistores de um mesmo tipo podem apresentar ganhos de corrente distintos, que podem variar em uma ampla faixa de valores. O transistor BC337, por exemplo, pode apresentar um ganho de corrente situado entre 60 e 630. Devido a essa variabilidade, a característica de saída fornecida pelo fabricante representa o comportamento médio de uma dada especificação de transistor.

Como na polarização por corrente de base constante o ponto de operação depende diretamente do ganho de corrente do transistor, é comum ocorrer uma diferença entre os valores obtidos no circuito e aqueles previstos em projeto.

A **Fig.8** ilustra o que ocorre quando o ganho do transistor é superior ao valor médio obtido das curvas características de saída contidas no folheto de especificações técnicas.

$$\beta' > \beta$$

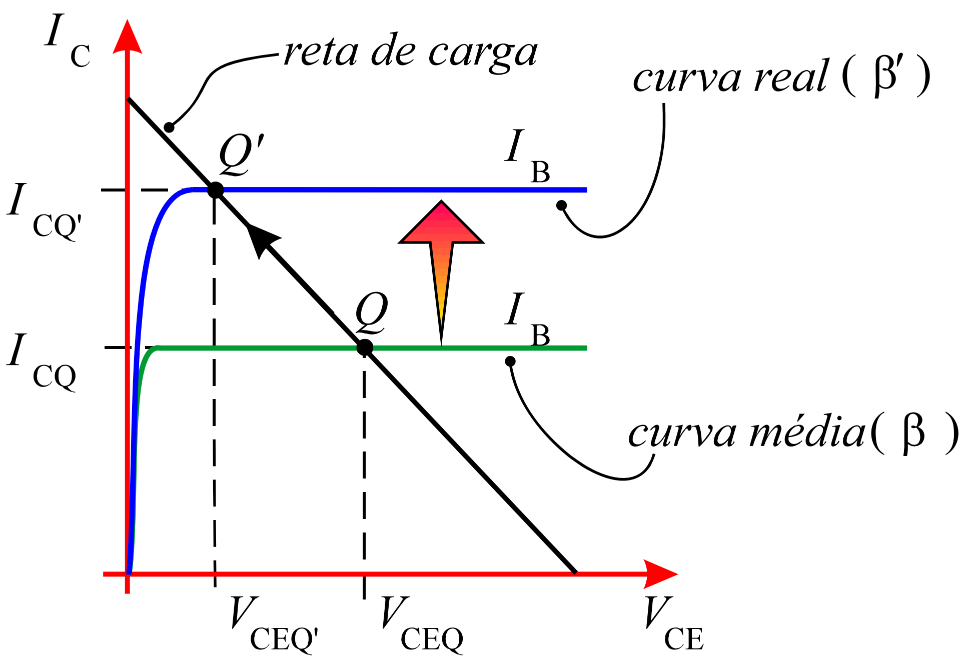


Fig.8 Alteração do ponto de operação para um transistor com ganho superior ao valor médio especificado pelo fabricante.

Como pode ser aí observado, o ponto de operação Q obtido da interseção da reta de carga com a curva média está deslocado para cima, ocorrendo no ponto Q' da curva característica do componente real. Note-se que, para uma mesma corrente de base I_B, a curva característica do componente real está deslocada para cima, pois o ganho de corrente do componente real β' é superior ao valor médio β fornecido no folheto de especificações do fabricante. Nessa situação, o valor real da tensão coletor-emissor $V_{CEQ'}$ é inferior ao valor esperado V_{CEQ} e a corrente de coletor real $I_{CQ'}$ é maior do que o valor I_{CQ} obtido da curva característica média.

A **Fig.9** mostra a alteração observada no ponto de operação quando o ganho do transistor é inferior ao valor médio. Nesse caso, o ponto de operação Q obtido na curva média está deslocado para baixo, ocorrendo no ponto Q' da curva característica referente à mesma corrente de base no componente real. Nessa situação, o valor real da tensão coletor-emissor $V_{CEQ'}$ é superior ao valor esperado V_{CEQ}, e a corrente de coletor real $I_{CQ'}$ é inferior ao valor I_{CQ} obtido da curva característica média.

$$\beta' < \beta$$

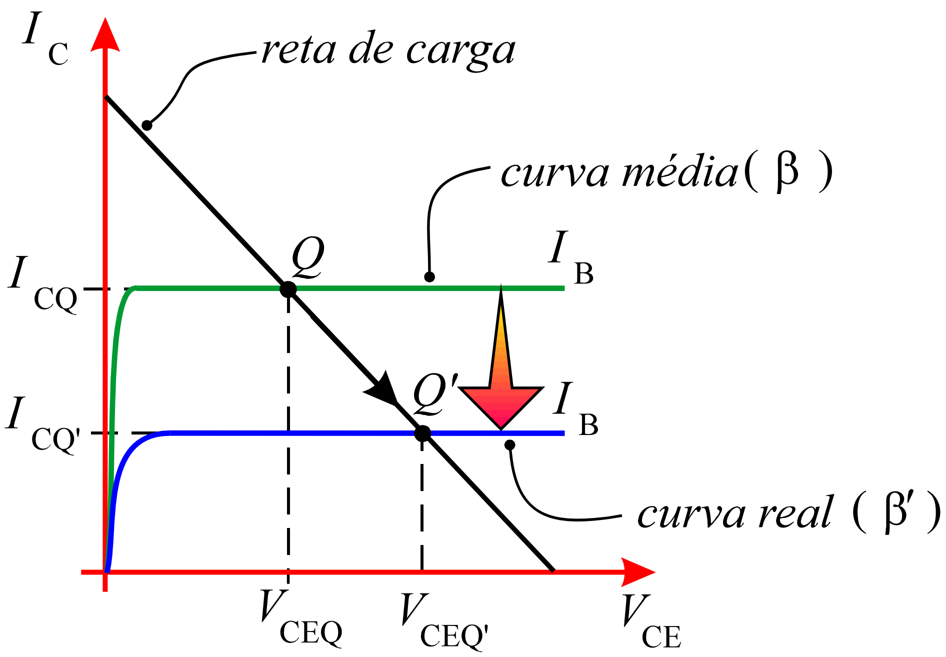


Fig.9 Alteração do ponto de operação para um transistor com ganho inferior ao valor médio especificado pelo fabricante.

A **Tabela 1** resume as alterações que podem ocorrer nos parâmetros do ponto de operação de um transistor.

Tabela 1 Possíveis modificações nos parâmetros elétricos de um transistor em relação aos valores previstos em projeto.

Ganho real > Ganho médio	Ganho real < Ganho médio
$\beta' > \beta$	$\beta' < \beta$
$V_{CEQ'} < V_{CEQ}$	$V_{CEQ'} > V_{CEQ}$
$I_{CQ'} > I_{CQ}$	$I_{CQ'} < I_{CQ}$

Quando diferenças significativas ocorrem, é necessário modificar o circuito de forma que o ponto de operação fique o mais próximo possível daquele desejado. Como o ganho de corrente do transistor não pode ser alterado, a correção deve ser feita alterando-se o resistor de base, conforme demonstrado nos exemplos a seguir.

Exemplo 2: O circuito mostrado na **Fig.10** utiliza um transistor BC337, e foi projetado para operar com os parâmetros mostrados na segunda coluna da **Tabela 2**, obtidos no ponto de operação *Q* da **Fig.10**. No entanto, após a montagem do circuito, foram observados os valores mostrados na terceira coluna da **Tabela 2**. Determinar o valor $R_{B'}$ do resistor de base para que o circuito opere com os valores desejados da corrente de coletor e da tensão coletor-emissor.

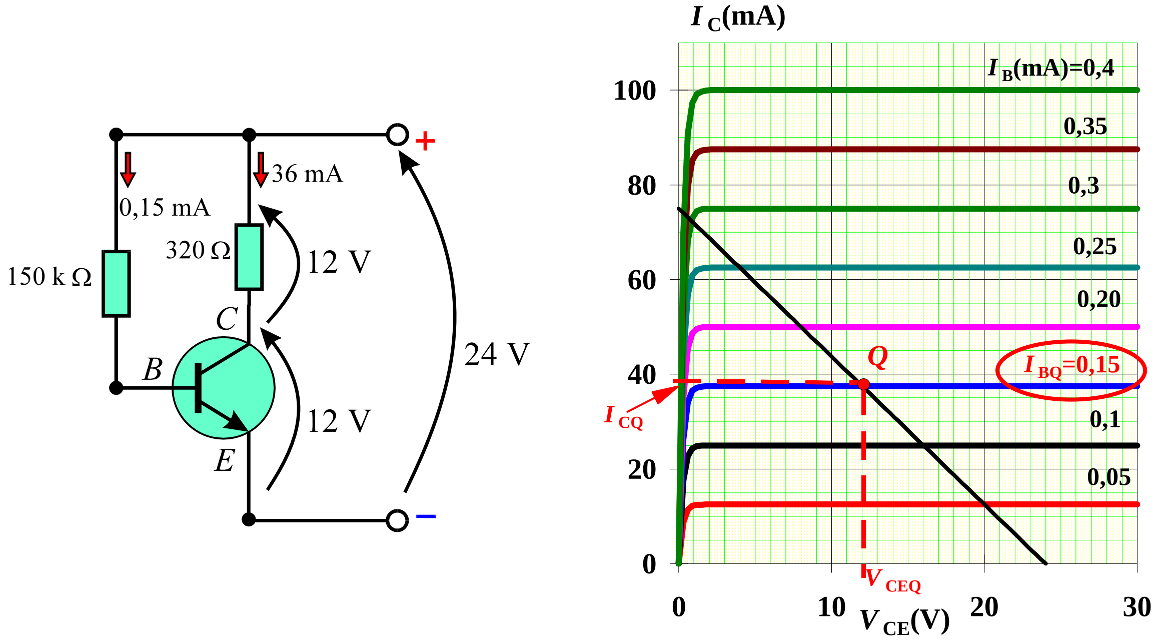


Fig.10 Circuito e curvas características para o **Exemplo 2**.

Tabela 2 Parâmetros de circuito para o **Exemplo 2**.

Parâmetro	Valor projetado	Valor observado
Tensão coletor-emissor	V_{CEQ} = 12 V	$V_{CEQ'}$= 7,5 V
Queda no resistor R_C	V_{RcQ}=12 V	$V_{RcQ'}$ = 16,5 V
Corrente de coletor	I_{CQ}=36 mA	$I_{CQ'}$= 50 mA

Para uma corrente de base I_{BQ}=0,15 mA, o ganho de corrente médio pode ser obtido utilizando-se o valor I_{CQ} = 36 mA listado na segunda coluna da **Tabela 2**, resultando em

$$\beta = \frac{I_{CQ}}{I_{BQ}} = \frac{36}{0{,}15} = 240$$

No entanto a corrente de coletor observada é $I_{CQ'}$=50 mA, resultando em um ganho real

$$\beta' = \frac{I_{CQ'}}{I_{BQ}} = \frac{50}{0{,}15} = 333{,}33$$

Portanto o ganho real é superior ao valor médio. Por essa razão a corrente de coletor resultante é superior ao valor projetado. Como conseqüência a queda de tensão no resistor R_C se torna maior, diminuindo assim a tensão coletor-emissor em relação ao valor calculado em projeto.

Para corrigir o ponto de operação do circuito, deve utilizar-se o valor do ganho real do transistor para determinar a corrente de base $I_{BQ'}$ que seria necessária para fornecer a corrente de coletor desejada de 36 mA. Isso pode ser feito utilizando-se o valor observado β' para o ganho de corrente resultando em

$$I_{BQ'} = \frac{I_{CQ'}}{\beta'} = \frac{36}{333{,}33} = 0{,}11\,\text{mA}$$

Ou seja, a corrente de base deve ser diminuída de 0,15 mA para 0,11 mA de forma que os valores desejados listados na segunda coluna da **Tabela 2** sejam obtidos. Essa diminuição no valor da corrente de base só pode ser obtida aumentando-se o valor R_B do resistor de base. O valor desejado $R_{B'}$ pode ser obtido pelo uso da **Eq.(2)**, fornecendo

$$R_{B'} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{I_{BQ'}} = \frac{24\text{ V} - 0{,}6\text{ V}}{0{,}00011\text{ A}} = 212{,}7\text{ k}\Omega$$

Exemplo 3: Para o mesmo circuito mostrado na **Fig.10**, projetado para operar com os parâmetros mostrados na segunda coluna da **Tabela 3**, foram observados os valores mostrados na terceira coluna da **Tabela 3**. Determinar o valor $R_{B'}$ do resistor de base para que o circuito opere com os valores desejados da corrente de coletor e da tensão coletor-emissor.

Tabela 3 Parâmetros de circuito para o **Exemplo 3**.

Parâmetro	Valor projetado	Valor observado
Tensão coletor-emissor	V_{CEQ} = 12 V	$V_{CEQ'}$= 15 V
Queda no resistor R_C	V_{RcQ}=12 V	$V_{RcQ'}$ = 9 V
Corrente de coletor	I_{CQ}=36 mA	$I_{CQ'}$ = 27 mA

Este exemplo segue os mesmos passos do **Exemplo 2**. No caso presente, o transistor apresenta um ganho real inferior ao ganho médio. O valor do ganho real é obtido utilizando-se o valor observado de 27 mA para a corrente de coletor, resultando em

$$\beta' = \frac{I_{CQ'}}{I_{BQ}} = \frac{27}{0{,}15} = 180$$

A corrente de base necessária para produzir uma corrente de coletor de 36 mA pode ser determinada utilizando-se o valor obtido para o ganho real do transistor, resultando em,

$$I_{BQ'} = \frac{I_{CQ}}{\beta'} = \frac{36}{180} = 0{,}2\ \text{mA}$$

O valor desejado $R_{B'}$ é obtido da **Eq.(2)**, fornecendo

$$R_{B'} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{I_{BQ'}} = \frac{24\ \text{V} - 0{,}6\ \text{V}}{0{,}0002\ \text{A}} = 117\ \text{k}\Omega$$

Regiões de operação de um transistor

A localização do ponto de operação de um estágio transistorizado sobre a reta de carga define três regiões de operação descritas a seguir.

REGIÃO DE CORTE

Um transistor está na região de corte quando a base é polarizada de forma a tornar a corrente de coletor praticamente nula. Essa condição é obtida na iminência de polarização inversa da junção base-emissor, conforme ilustrado na **Fig.11a**.

Na região de corte a corrente de base é reduzida a um valor praticamente nulo. Da relação entre correntes no transistor dada pela **Eq.(3)** e reproduzida a seguir

$$I_{\mathrm{C}} = \beta I_{\mathrm{B}} + (\beta + 1) I_{\mathrm{CBO}} \qquad (7)$$

a condição $I_{\mathrm{B}} \approx 0$ fornece

$$I_{\mathrm{C,corte}} = (\beta + 1) I_{\mathrm{CBO}} = I_{\mathrm{CEO}} \qquad (8)$$

Dessa forma, a corrente de coletor corresponde à corrente de fuga, com um valor da ordem de alguns microampères para transistores de silício.

Devido ao pequeno valor da corrente de coletor, a queda de tensão no resistor de coletor é praticamente nula e a tensão coletor-emissor torna-se

$$V_{\mathrm{CE,corte}} \approx V_{\mathrm{CC}} \qquad (9)$$

No diagrama $I_C \times V_{CE}$, a região de corte está localizada bem próxima ao eixo horizontal, conforme mostrado na **Fig.11b**.

(a) (b)

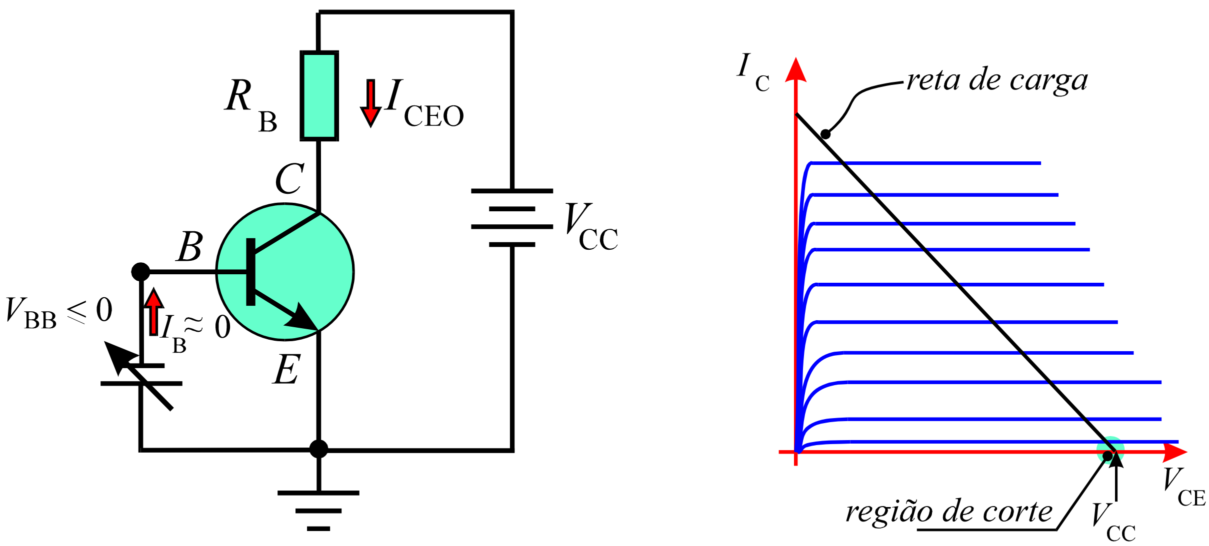


Fig.11 **(a)** Circuito transistorizado operando na condição de corte. **(b)** Região de corte no diagrama da característica de saída do transistor.

As características da região de corte estão sumarizadas na **Tabela 4**.

Tabela 4 Características da região de corte.

Junção coletor-base: inversamente polarizada.
Junção base-emissor: na iminência de polarização inversa.
Corrente de base: $I_B \approx 0$.
Corrente de coletor: $I_C = I_{CEO}$.
Tensão coletor-emissor: $V_{CE} \approx V_{CC}$.

Nos transistores de silício basta anular-se a corrente de base para levar o transistor à condição de corte.

REGIÃO DE SATURAÇÃO

Um transistor está na região de saturação quando a junção base-emissor está diretamente polarizada com a condição adicional de a tensão V_{CE} tornar-se inferior a tensão V_{BE}.

As conseqüências decorrentes dessa condição podem ser analisadas com base no transistor *npn* mostrado na **Fig.12**. A relação entre tensões nos terminais do transistor pode ser posta na forma

$$V_{CB} = V_{CE} - V_{BE} \tag{10}$$

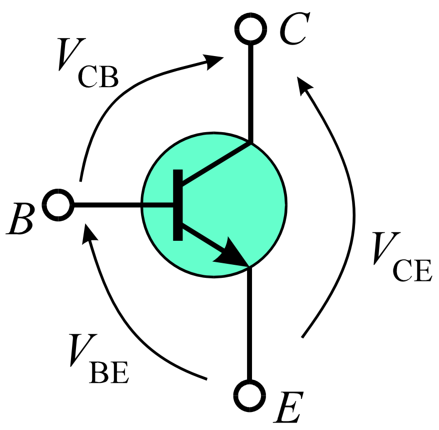


Fig.12 Tensões entre terminais em um transistor *npn*.

Da **Eq.(10)** nota-se que a condição $V_{CE} < V_{BE}$ fornece

$$V_{CE} - V_{BE} < 0 \Rightarrow V_{CB} < 0$$

Tendo a base do transistor *npn* polaridade positiva em relação ao coletor, a junção base-coletor fica diretamente polarizada. Portanto, na região de saturação a corrente de coletor pode ser razoavelmente elevada.

No gráfico com as curvas características de saída do transistor, a região de saturação fica localizada nas proximidades do eixo vertical. Para auxiliar o exame das curvas características naquela região, os folhetos de especificações técnicas fornecem um gráfico adicional detalhando a região de saturação, do tipo mostrado na **Fig.13**.

Naquela porção do diagrama da **Fig.13**, os valores de V_{CE} são geralmente inferiores ao potencial de barreira de uma junção semicondutora. Note-se que nessa região a corrente de coletor é influenciada tanto pelo valor da tensão V_{CE} como pelo valor da corrente de base.

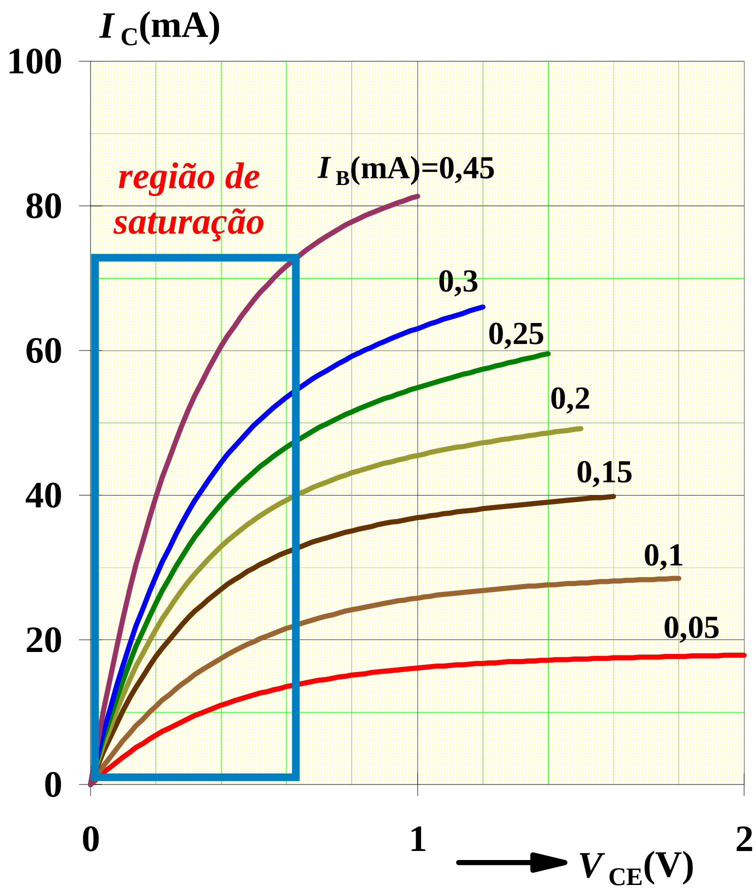


Fig.13 Gráfico detalhando a região de saturação de um transistor.

As características da região de saturação estão sumarizadas na **Tabela 5**.

Tabela 5 Características da região de saturação.

Junção coletor-base: diretamente polarizada.
Junção base-emissor: diretamente polarizada com V_{BE}>V_{CE}.
Corrente de coletor: influenciada pelos valores de I_B e de V_{CE}.

REGIÃO ATIVA

A região ativa corresponde a todo o trecho da reta de carga situado entre as regiões de corte e de saturação, conforme ilustrado na **Fig.14**.

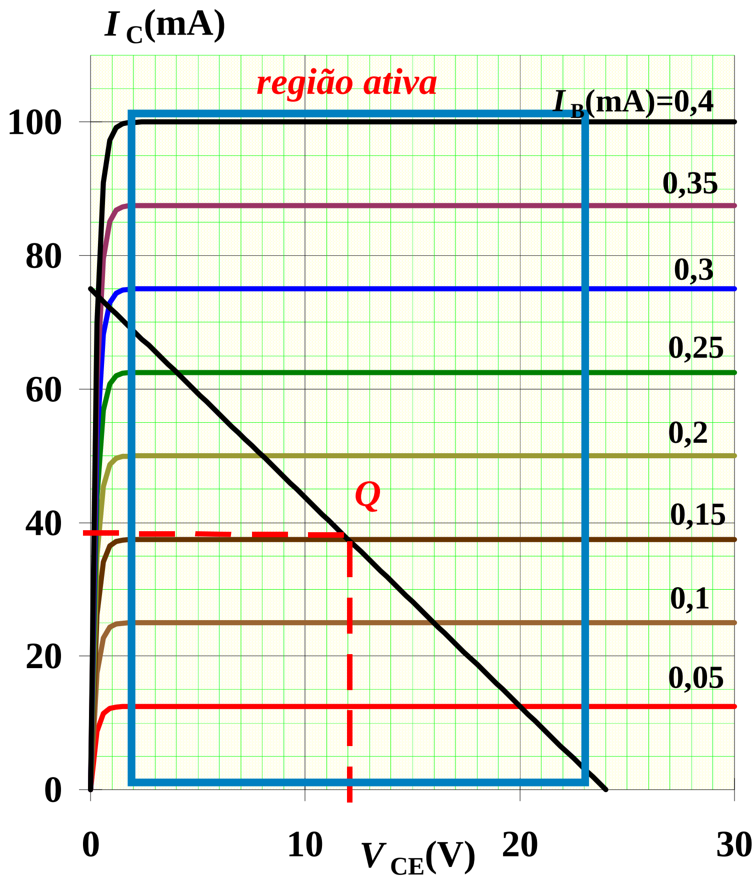


Fig.14 Região ativa no gráfico das curvas características de um transistor.

Essa é a região característica de funcionamento dos estágios amplificadores, pois é aí que a corrente de coletor é controlada apenas pela corrente de base, não sofrendo praticamente nenhuma influência da tensão coletor-emissor. Para pontos de operação nessa região são válidas as regras de polarização delineadas na **Tabela 6**.

Tabela 6 Características da região ativa.

Junção coletor-base: inversamente polarizada.
Junção base-emissor: diretamente polarizada com $V_{BE} < V_{CE} < V_{CC}$.
Corrente de coletor: Influenciada apenas pela corrente de base.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. O que se entende por polarização de base por corrente constante em um transistor?

2. Em um circuito transistorizado na configuração emissor comum, quais os elementos que compõem a malha da base?

3. Descreva de que forma a temperatura influencia o ponto de operação de um circuito transistorizado na configuração emissor comum.

4. O que é fator de estabilidade?

5. Qual a relação entre estabilidade térmica e fator de estabilidade em um circuito transistorizado?

6. Em que situações o método de polarização de base por corrente constante deve ser evitado? Por quê?

7. Descreva que alterações são produzidas no ponto de operação de um transistor na configuração emissor comum, nas seguintes situações:

   (a) ganho real > ganho médio.

   (b) ganho real < ganho médio.

8. Quais as regiões de operação de um transistor e onde estão situadas no diagrama $I_C \times V_{CE}$?

9. Qual a região que deve ser utilizada para o emprego de transistores em estágios amplificadores?

BIBLIOGRAFIA

CIPELLI, Antônio Marco Vicari & SANDRINI, Valdir João. Teoria do desenvolvimento de Projetos de Circuitos Eletrônicos . 7.ed. São Paulo, Érica, 1983, 580p.

MILLMAN, Jacob & HALKIAS, Christos C. Eletrônica: Dispositivos e circuitos, Trad. Elédio José Robalinho e Paulo Elyot Meirelles Villela. São Paulo, Mc-Graw Hill do Brasil. 1981, v.2

SENAI/ Departamento Nacional. Reparador de circuitos eletrônicos; eletrônica básica II. Rio de Janeiro, Divisão de Ensino e Treinamento, c 1979. (Coleção Básica Senai, Módulo 1).

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Introdução

Um fator que sempre representa um problema na utilização dos componentes semicondutores é a dependência térmica dos parâmetros materiais. O transistor não foge à regra. Circuitos transistorizados são sensíveis às variações de temperatura, sofrendo mudanças no ponto de operação.

Uma forma de amenizar os efeitos da dependência térmica é polarizar o transistor por divisão de tensão.

Este fascículo tratará dessa técnica de polarização, tratando do princípio de funcionamento do circuito, do cálculo de parâmetros elétricos e das características, visando a capacitar o leitor na tarefa de polarização e correção do ponto de operação de um circuito transistorizado.

Para a boa compreensão do conteúdo e desenvolvimento das atividades contidas neste fascículo, o leitor deverá estar familiarizado com os conceitos relativos a:

- Transistor bipolar: relação entre parâmetros de circuito.
- Transistor bipolar: ponto de operação.
- Divisor de tensão.

Polarização por divisor de tensão

A polarização da base de um transistor pode ser feita a partir da utilização de um divisor de tensão, através do qual aplica-se uma tensão V_{BE} entre a base e o emissor do transistor.

A **Fig.1** mostra um circuito transistorizado que emprega esse tipo de polarização. Essa técnica é denominada de **polarização de base por divisor de tensão**.

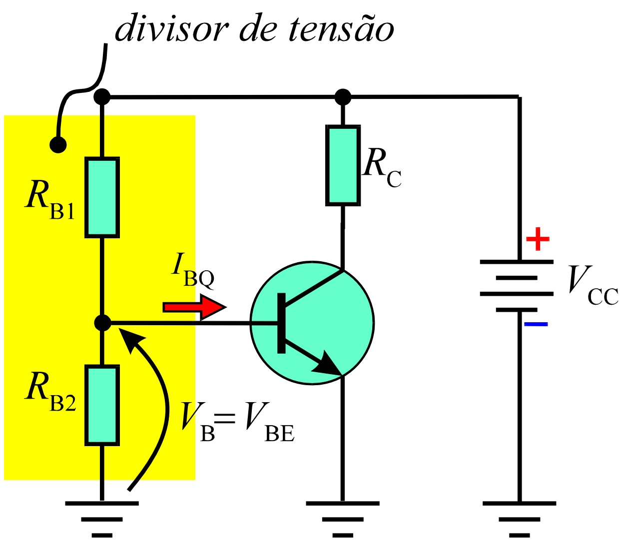


Fig.1 Circuito transistorizado com base polarizada por divisor de tensão.

Do divisor de tensão mostrado na **Fig.1** resulta um potencial V_B no terminal base do transistor que polariza diretamente a junção base-emissor, produzindo assim a corrente de base quiescente I_{BQ}.

A finalidade do divisor de tensão é polarizar diretamente a junção base-emissor.

Como se pode observar na **Fig.1**, com o emissor aterrado, o potencial da base V_B corresponde à tensão V_{BE} aplicada à junção base-emissor do transistor. Dessa forma, o controle da corrente I_{BQ} é obtido ajustando-se a tensão V_{BE} fornecida pelo divisor.

Normalmente os circuitos polarizados por divisão de tensão têm ainda um resistor de emissor R_E, como mostrado na **Fig.2**. Esse resistor tem por finalidade melhorar a estabilidade térmica do circuito.

A inclusão de um resistor de emissor no circuito de polarização de um transistor melhora a estabilidade térmica do circuito.

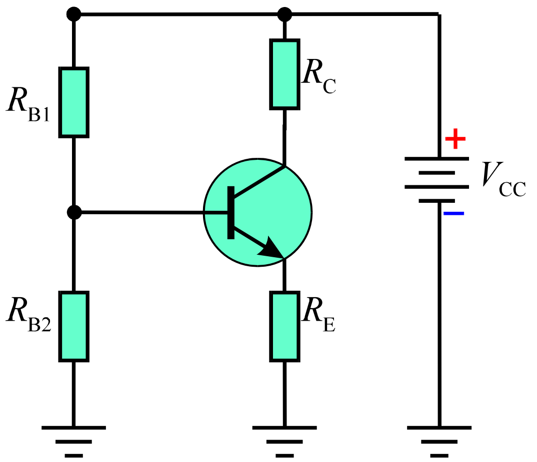


Fig.2 Emprego de um resistor de emissor em um circuito transistorizado.

O uso conjunto de um divisor de tensão e de um resistor de emissor propicia um alto grau de estabilidade térmica no circuito. Outra característica importante desse tipo de polarização é a menor variação dos parâmetros de polarização quando o transistor é substituído.

ANÁLISE DO CIRCUITO DO COLETOR

Nos circuitos polarizados por divisor de tensão, a malha de coletor, mostrada na **Fig.3**, é composta dos seguintes elementos:

- Fonte de alimentação.
- Resistor de coletor.
- Transistor.
- Resistor de emissor.

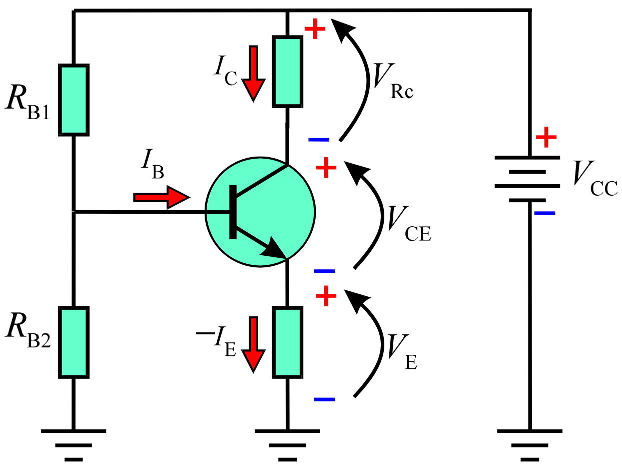


Fig.3 Malha de coletor de um transistor polarizado por divisor de tensão.

Como se pode observar na **Fig.3**, a tensão fornecida pela fonte distribui-se sobre os elementos da malha do coletor na forma

$$V_{CC} = V_R + V_{CE} + V_E \qquad (1)$$

onde

$$V_{Rc} = R_C I_C \qquad (2)$$

$$V_E = R_E(-I_E) \qquad (3)$$

Na **Eq.(1)** a dependência da tensão V_{CE} na corrente de coletor é determinada através das curvas características de saída do transistor.

A **Eq.(3)** pode ser reescrita na forma

$$V_E = R_E(I_C + I_B) \qquad (4)$$

Como a corrente de base é geralmente muito inferior à corrente de coletor, é válida a seguinte aproximação:

$$I_C + I_B \approx I_C$$

e a **Eq.(4)** pode ser posta na forma

$$V_E \approx R_E I_C \qquad (5)$$

A seguir é apresentado um exemplo de utilização das equações do circuito do coletor.

<u>Exemplo 1:</u> Para o circuito mostrado na **Fig.4**, determinar os valores de V_{Rc}, V_E e V_{CE}.

As tensões nos resistores de coletor e de emissor são obtidas das **Eqs.(2)** e **(5)**, resultando em

$$V_{Rc} = 1.000\,\Omega \times 0{,}004\text{ A} = 4\text{ V}$$

$$V_E = 270\,\Omega \times 0{,}004\text{ A} = 1{,}08\text{ V}$$

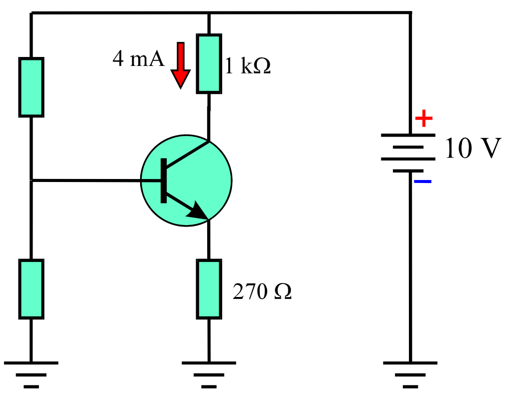


Fig.4 Circuito transistorizado do **Exemplo1**.

A tensão V_{CE} é obtida da **Eq.(1)**:

$$V_{CC} = V_{Rc} + V_{CE} + V_E \Rightarrow V_{CE} = V_{CC} - V_{Rc} - V_E \Rightarrow V_{CE} = 10 - 4 - 1{,}08$$

$$\boxed{\Rightarrow V_{CE} = 4{,}92\ \text{V}}$$

O CIRCUITO DA BASE

O circuito da base, que compreende o divisor de tensão, tem por finalidade polarizar diretamente a junção base-emissor do transistor e estabelecer o valor quiescente da corrente de base I_{BQ}.

A tensão base-emissor V_{BE} é a diferença de potencial entre os terminais *B* e *E* do transistor. Como se pode observar na **Fig.5**

$$V_{BE} = V_B - V_E \qquad (6)$$

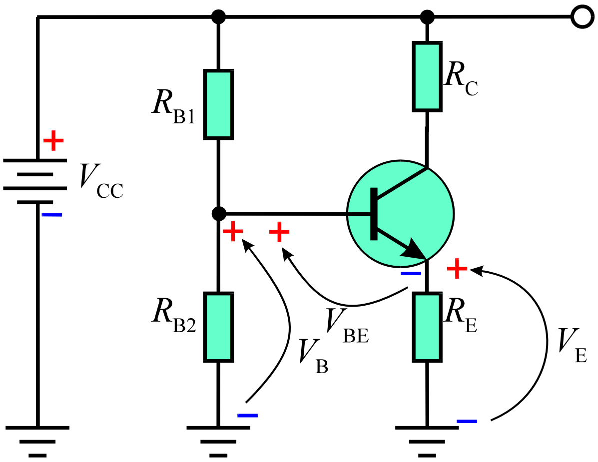


Fig.5 Circuito transistorizado com base polarizada por divisor de tensão.

A tensão V_{BE} aplicada à junção base-emissor dá origem a uma corrente de base que pode ser obtida a partir da curva característica da junção. Dessa forma, a junção base-emissor se comporta efetivamente como um diodo diretamente polarizado, conforme ilustrado na **Fig.6**.

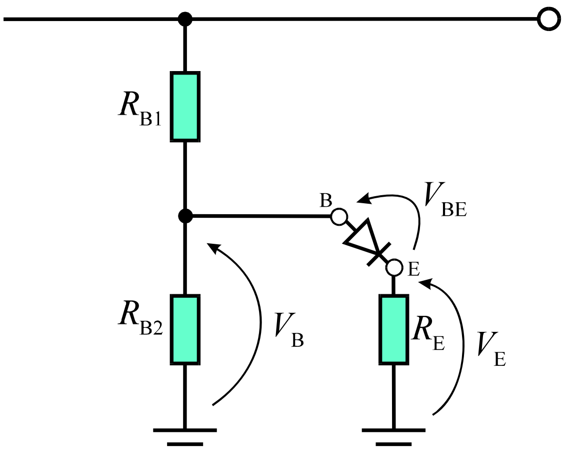


Fig.6 Circuito equivalente da junção base-emissor, com base polarizada por divisor de tensão.

DETERMINAÇÃO DOS ELEMENTOS DE CIRCUITO

A inclusão do resistor de emissor torna o circuito mais estável termicamente, o que é interessante do ponto de vista prático. Entretanto, essa adição modifica a análise gráfica do circuito, pois a reta de carga deve levar em conta a presença daquele novo elemento no circuito. Por essa razão, a determinação dos valores dos resistores de polarização é usualmente feita matematicamente.

Para simplificar a análise matemática, podem ser consideradas algumas aproximações e estimativas, que em nada prejudicam os resultados obtidos, como delineado a seguir.

CORRENTE DE EMISSOR

A pequena diferença existente entre I_C e I_E permite utilizar a aproximação

$$I_E \approx I_C$$

cujo erro é pequeno comparado com a tolerância de 5 a 10% dos resistores do circuito.

GANHO DO TRANSISTOR

O ganho de transistores que empregam a polarização por divisor de tensão usualmente satisfaz a condição $\beta \geq 100$.

PARÂMETROS DE ENTRADA

Na determinação dos valores dos elementos de circuito, mostrados na **Fig.7**, os parâmetros de entrada são geralmente:

- A tensão de alimentação, V_{CC}.
- A corrente de coletor quiescente, I_{CQ}.
- A tensão quiescente sobre o resistor de coletor, V_{RcQ}.

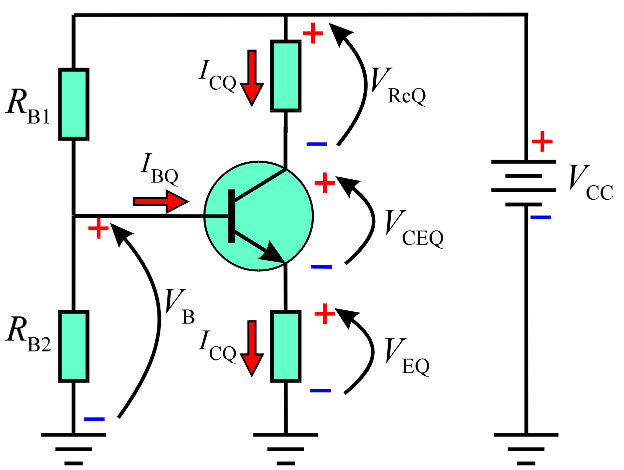


Fig.7 Alguns parâmetros do circuito transistorizado.

A corrente de coletor I_{CQ} nos estágios transistorizados polarizados por divisor de tensão assume normalmente valores que variam de 1 a 10 mA.

O parâmetro V_{RcQ} é diretamente relacionado à tensão de alimentação. Na prática adota-se normalmente uma tensão no resistor de coletor próxima à metade da tensão de alimentação, ou seja,

$$V_{RcQ} \approx \frac{V_{CC}}{2} \tag{7}$$

PARÂMETROS DA MALHA DO COLETOR

Dispondo dos valores V_{CC}, I_{CQ} e V_{RcQ} pode-se determinar os valores dos componentes da malha do coletor, mostrados na **Fig.8**.

Resistor de coletor: É calculado através da Lei de Ohm, utilizando os valores conhecidos de I_{CQ} e V_{RcQ}, resultando em

$$R_C \approx \frac{V_{RcQ}}{I_{CQ}} \tag{8}$$

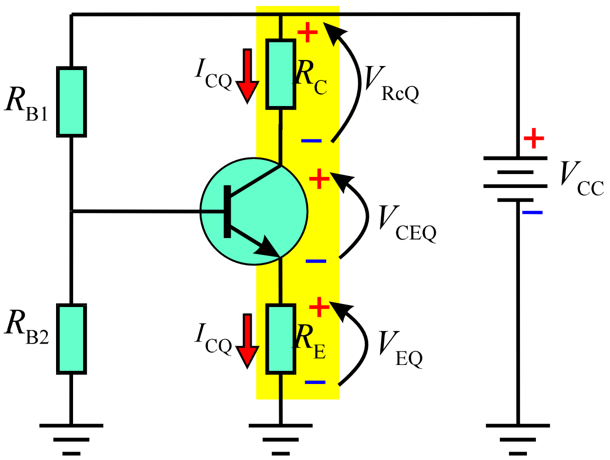


Fig.8 Parâmetros da malha do coletor no circuito transistorizado.

Resistor de emissor: Observa-se na prática que o emprego de um resistor de emissor tal que a queda de tensão satisfaça à condição

$$V_{EQ} \approx 0{,}1 V_{CC} \tag{9}$$

permite a obtenção de um fator de estabilidade ótimo, usualmente na faixa de valores $10 \leq S \leq 15$. Nessa condição, o resistor de emissor é determinado da expressão

$$R_E \approx \frac{0{,}1 V_{CC}}{I_{CQ}} \tag{10}$$

Resistores de base: O divisor de tensão formado pelos resistores de base tem por finalidade fornecer a tensão V_B à base do transistor, como mostrado na **Fig.9**.

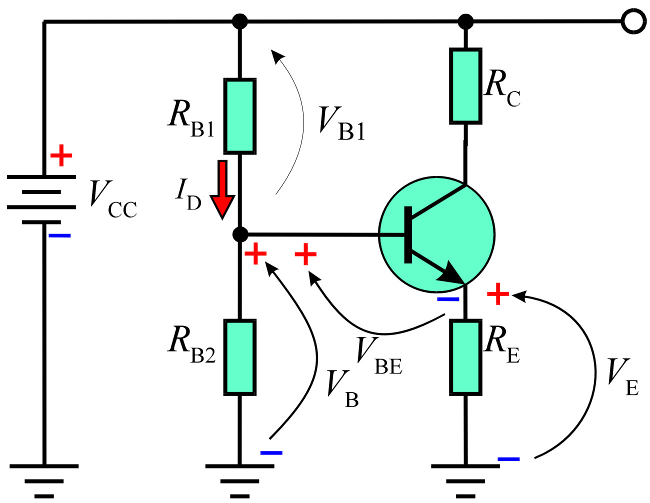


Fig.9 Tensão fornecida pelo divisor à base do transistor.

Para que a junção base-emissor conduza, a tensão fornecida à base deve corresponder à soma

$$V_B = V_{BEQ} + V_{EQ} \tag{11}$$

Com base na **Fig.9**, a queda de tensão sobre R_{B1} pode ser obtida de

$$V_{B1} = V_{CC} - V_B \tag{12}$$

Dispondo dos dois valores de tensão sobre os resistores, deve-se assumir um valor conhecido para a corrente I_D através do divisor. Esse valor deve ser suficientemente grande para que pequenas variações na corrente de base não alterem significativamente a proporção de divisão da tensão sobre os resistores. Dessa forma, é prática usual adotar uma corrente através do divisor satisfazendo à condição

$$I_D = 0{,}1 I_{CQ} \tag{13}$$

Com essa escolha, considerando-se que o transistor tenha um ganho de pelo menos 100, a corrente do divisor é pelo menos 10 vezes superior à corrente de base.

Uma vez obtidos os parâmetros V_{B1} e V_B por intermédio das **Eqs.(11)** e **(12)**, utiliza-se a **Eq.(13)** para se obterem os valores de resistência do divisor, resultando em

$$R_{B1} = \frac{V_{CC} - V_B}{I_D} \tag{14}$$

$$R_{B2} = \frac{V_{BEQ} + V_{EQ}}{I_D} \tag{15}$$

As expressões utilizadas na determinação dos parâmetros do circuito transistorizado com polarização por divisor de tensão estão sumarizadas na **Tabela 1.**

Tabela 1 Sumário das expressões utilizadas na determinação dos parâmetros de um circuito transistorizado com polarização por divisor de tensão.

Parâmetros de entrada	
Tensão de alimentação	V_{CC}
Tensão no resistor de coletor ou tensão coletor-emissor	V_{RcQ} ou V_{CEQ}
Corrente de coletor	I_{CQ}
Parâmetros de saída	
Parâmetro	Equação
Tensão no resistor de emissor	$V_{EQ} \approx 0{,}1V_{CC}$
Tensão no resistor de coletor, conhecida a tensão coletor-emissor	$V_{RcQ} = V_{CC} - V_{CEQ} - V_{EQ}$
Resistor de coletor	$R_C \approx \frac{V_{RcQ}}{I_{CQ}}$
Resistor de emissor	$R_E \approx \frac{0{,}1V_{CC}}{I_{CQ}}$
Tensão no resistor R_{B2}	$V_B = V_{BEQ} + V_{EQ}$
Tensão no resistor R_{B1}	$V_{B1} = V_{CC} - V_B$
Corrente no divisor	$I_D = 0{,}1I_{CQ}$
Resistor R_{B2}	$R_{B2} = \frac{V_{BEQ} + V_{EQ}}{I_D}$
Resistor R_{B1}	$R_{B1} = \frac{V_{CC} - V_B}{I_D}$

Os exemplos a seguir ilustram o emprego das expressões do circuito transistorizado com polarização por divisor de tensão.

<u>Exemplo 1:</u> Para o circuito mostrado na **Fig.10**, determinar os valores de R_C, R_E, R_{B1} e R_{B2} para que o circuito opere com uma corrente de coletor de 5,8 mA e uma tensão no resistor de coletor de 10 V.

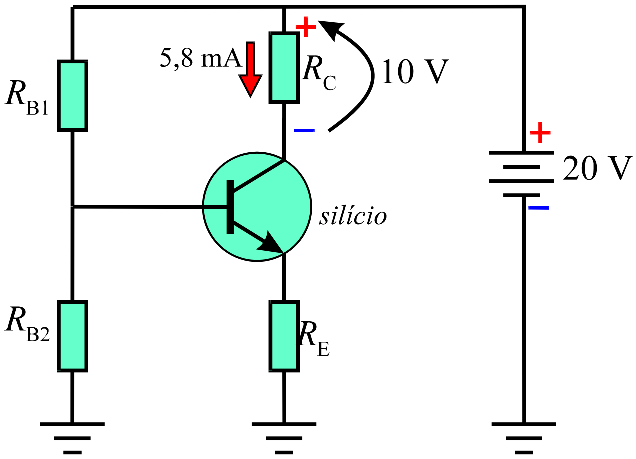


Fig.10 Circuito transistorizado para o **Exemplo 1**.

Utilizando a **Tabela 1** resulta:

Parâmetros de entrada	
Tensão de alimentação	$V_{CC} = 20$ V
Tensão no resistor de coletor	$V_{RcQ} = 10$ V
Corrente de coletor	$I_{CQ} = 5{,}8$ mA
Parâmetros de saída	
Resistor de coletor	$R_C \approx \frac{10}{0{,}0058} = 1.724\,\Omega$
Tensão no resistor de emissor	$V_{EQ} \approx 0{,}1 \times 20 = 2$ V
Resistor de coletor	$R_C \approx \frac{10}{0{,}0058} = 1.724\,\Omega$
Resistor de emissor	$R_E \approx \frac{2}{0{,}0058} = 344\,\Omega$
Tensão no resistor R_{B2}	$V_B = 0{,}6 + 2 = 2{,}6$ V
Tensão no resistor R_{B1}	$V_{B1} = 20 - 2{,}6 = 17{,}4$ V
Corrente no divisor	$I_D = 0{,}1 \times 5{,}8 = 0{,}58$ mA
Resistor R_{B2}	$R_{B2} = \frac{0{,}6 + 2}{0{,}00058} = 4{,}48\,k\Omega$
Resistor R_{B1}	$R_{B1} = \frac{20 - 2{,}6}{0{,}00058} = 30\,k\Omega$

Exemplo 2: Para o circuito mostrado na **Fig.11**, determinar os valores de R_C, R_E, R_{B1} e R_{B2} para obter uma tensão coletor-emissor de 7 V e uma corrente de coletor de 12 mA.

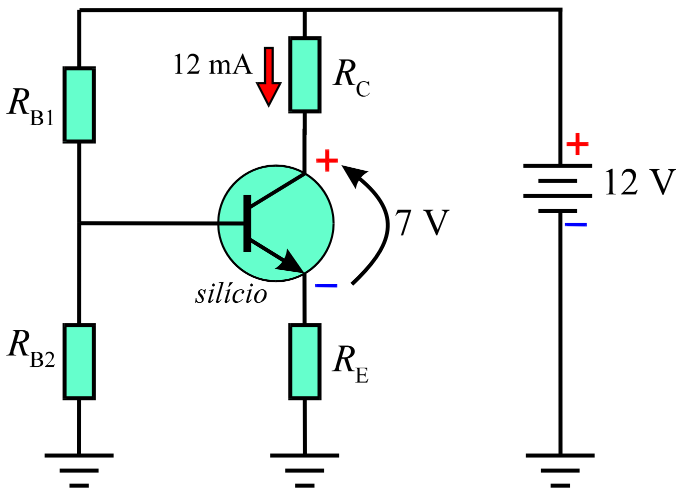


Fig.11 Circuito transistorizado para o **Exemplo 2**.

Utilizando a **Tabela 1** resulta:

Parâmetros de entrada	
Tensão de alimentação	$V_{CC} = 12$ V
Tensão coletor-emissor	$V_{CEQ} = 7$ V
Corrente de coletor	$I_{CQ} = 12$ mA
Parâmetros de saída	
Tensão no resistor de emissor	$V_{EQ} \approx 0{,}1 \times 12 = 1{,}2$ V
Tensão no resistor de coletor	$V_{RcQ} = 12 - 7 - 1{,}2 = 3{,}8$ V
Resistor de emissor	$R_{EQ} \approx \frac{1{,}2}{0{,}012} = 100\ \Omega$
Resistor de coletor	$R_C \approx \frac{3{,}8}{0{,}012} = 317\ \Omega$
Tensão no resistor R_{B2}	$V_B = 0{,}6 + 1{,}2 = 1{,}8$ V
Tensão no resistor R_{B1}	$V_{B1} = 12 - 1{,}8 = 10{,}2$ V
Corrente no divisor	$I_D = 0{,}1 \times 12 = 1{,}2$ mA
Resistor R_{B2}	$R_{B2} = \frac{0{,}6 + 1{,}2}{0{,}0012} = 1.500\ \Omega$
Resistor R_{B1}	$R_{B1} = \frac{12 - 1{,}8}{0{,}0012} = 8.500\ \Omega$

MODIFICAÇÃO DO PONTO DE OPERAÇÃO

Os estágios transistorizados polarizados por divisor de tensão possuem ótima estabilidade térmica, não necessitando de correções quando submetidos a variações de temperatura. Dessa forma, a alteração intencional do ponto de operação só pode ser obtida pela modificação de alguns elementos de circuito.

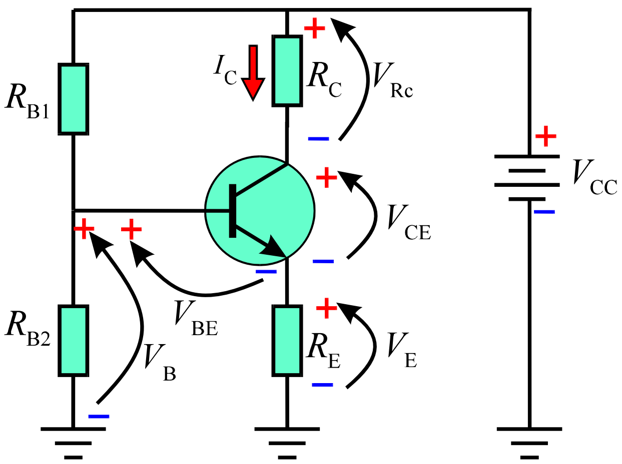


Fig.12 Estágio transistorizado com base polarizada por divisor de tensão.

A discussão a seguir ilustra a forma de obtenção de um aumento ou diminuição da tensão coletor-emissor de um estágio polarizado por divisor de tensão com os parâmetros indicados na **Fig.12**.

Seja, por exemplo, a situação em que se deseja aumentar a tensão V_{CE} do transistor. Para isso é necessário reduzir a queda de tensão nos resistores R_E e R_C, como sugere a **Fig.13**.

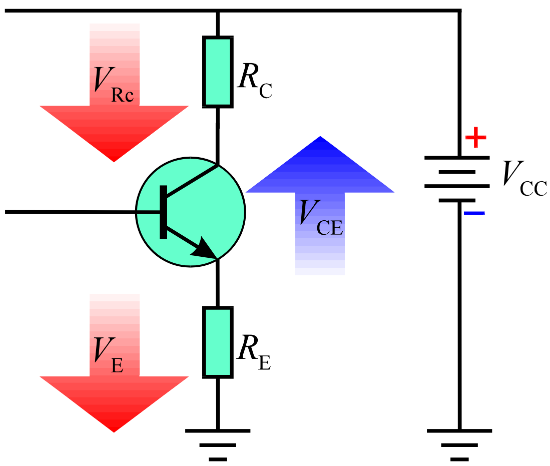
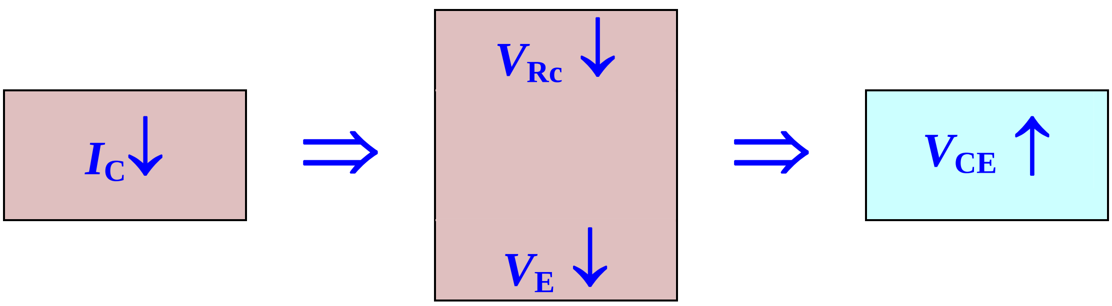


Fig.13 Aumento de V_{CE} pela diminuição dos parâmetros V_{Rc} e V_E.

As tensões V_{Rc} e V_E são proporcionais à corrente I_C, e portanto uma redução nos valores de V_{Rc} e V_E pode ser obtida pela redução de I_C.



Como a corrente I_C é proporcional a I_B , para reduzir I_C deve-se reduzir I_B.

$$I_C \downarrow \quad \Rightarrow \quad I_B \downarrow$$

A corrente I_B varia com a tensão V_{BE} de acordo com a curva mostrada na **Fig.14** e, portanto, uma redução na corrente I_B pode ser obtida diminuindo-se a tensão V_{BE}.

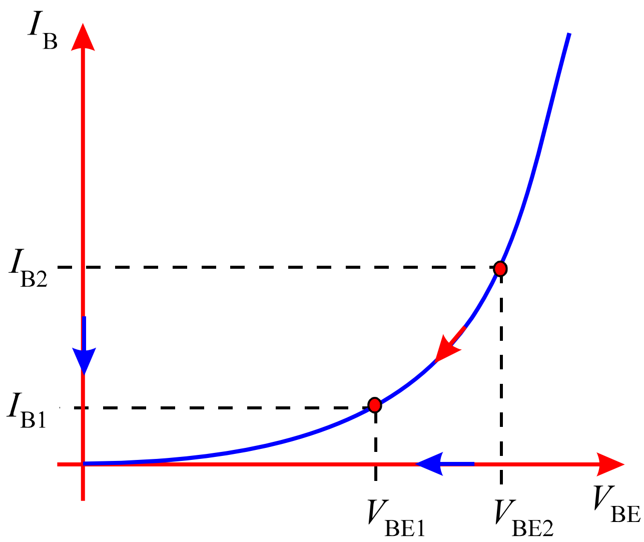


Fig.14 Curva característica $I_B \times V_{BE}$.

Como mostra a **Fig.15**, a tensão V_{BE} corresponde à diferença de potencial entre os terminais da base e do emissor. Com V_E já tendo sido reduzido pela redução de I_C, deve-se também reduzir V_B para obter-se a diminuição desejada em V_{BE}.

Como se pode observar na **Fig.15**, a tensão V_B é aquela fornecida pelo divisor de tensão e corresponde à queda de tensão sobre o resistor R_{B2}. Assim a diminuição de V_{BE} pode ser obtida diminuindo o valor de R_{B2} e aumentando o valor de R_{B1}, de forma a garantir que a corrente I_D não sofra nenhuma modificação substancial. Esse efeito está ilustrado no diagrama seguinte.

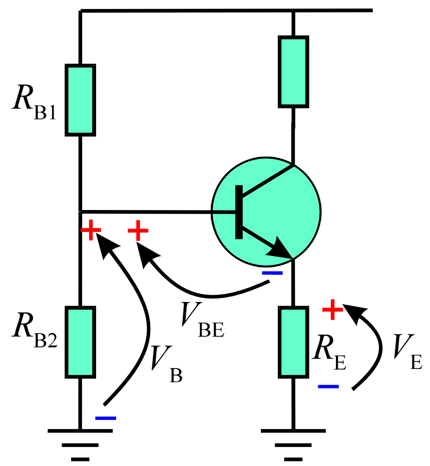


Fig.15 Trecho do estágio transistorizado e relação entre tensões na malha da base.

$$R_{B1} \uparrow, \; R_{B2} \downarrow \quad \Rightarrow \quad V_{BE} \downarrow$$

O processo de diminuição da tensão V_{CE} pela alteração dos resistores do divisor está representado diagramaticamente na **Fig.16**.

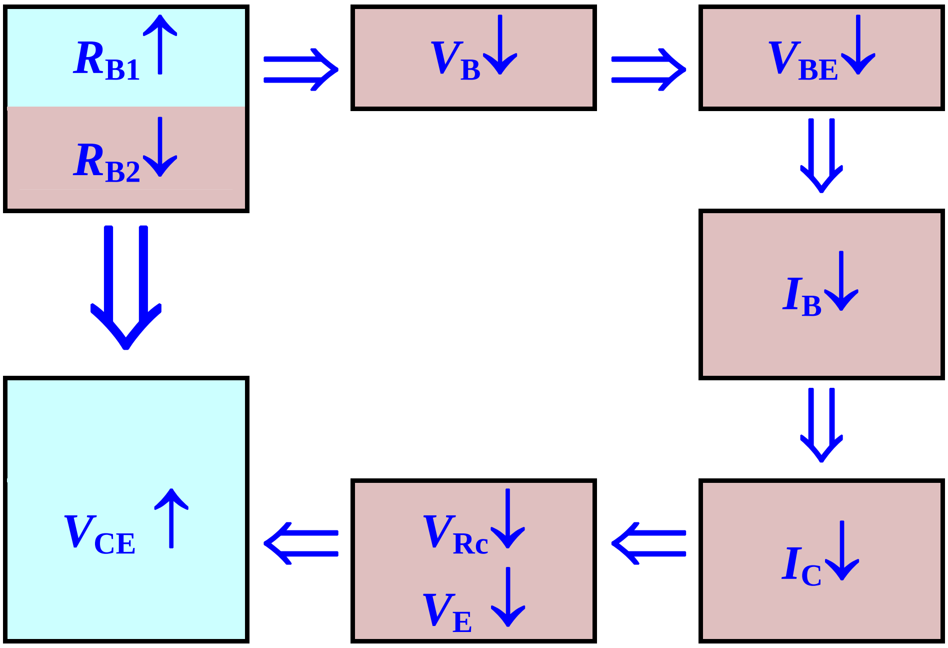


Fig.16 Diagrama representativo do processo de aumento da tensão V_{CE}.

Para se obter uma redução na tensão V_{CE} do transistor, deve-se reduzir R_{B1} e aumentar R_{B2}, como sugere o diagrama mostrado na **Fig.17**.

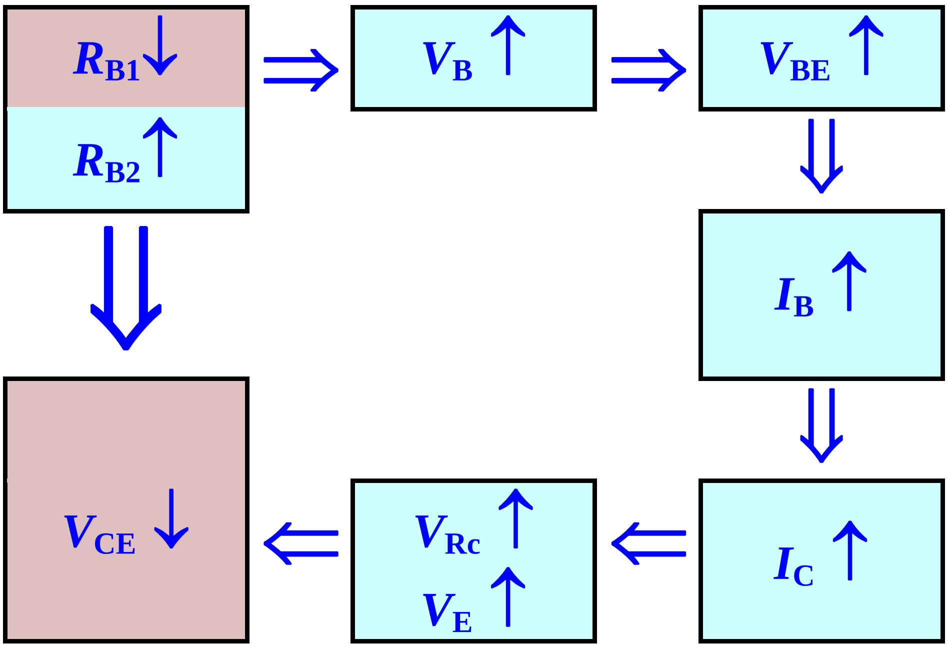


Fig.17 Diagrama representativo do processo de redução da tensão V_{CE}.

FATOR DE ESTABILIDADE

Os circuitos polarizados por divisor de tensão exibem um fator de estabilidade S de bom a ótimo. A alta estabilidade térmica desse método de polarização deve-se, principalmente, à inclusão do resistor de emissor.

O fator de estabilidade para esse tipo de circuito pode ser calculado da expressão

$$S = \frac{R_E + R_B}{R_E + \left(\frac{R_B}{\beta + 1}\right)} \qquad (16)$$

onde R_B é a resistência equivalente do divisor, dada por

$$R_B = \frac{R_{B1} R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \qquad (17)$$

O PROCESSO DE ESTABILIZAÇÃO TÉRMICA

As variações de temperatura influenciam a corrente de coletor do circuito, através da corrente de fuga I_{CBO}. Essa afirmação é o resultado da relação entre correntes no transistor

$$I_C = \beta I_B + (\beta + 1) I_{CBO} \qquad (18)$$

$\Uparrow$ (em I_{CBO}): *variável com a temperatura*

A componente de fuga da corrente de coletor não pode ser alterada externamente pois se deve a fenômenos internos ao transistor. A polarização por divisor de tensão atua, no entanto, na parcela de I_C que é dependente da corrente de base, fazendo que as variações na corrente de fuga sejam compensadas por variações opostas na corrente I_B.

Utilizando a condição de alto ganho, i.e., β>>1, a **Eq.(18)** pode ser aproximada pela expressão

$$I_C = \beta\left(I_B + I_{CBO}\right) \qquad (19)$$

$\Uparrow \quad \Uparrow$

variações em I_{CBO} são compensadas por variações opostas em I_B

A correção automática sugerida na **Eq.(19)** pode ser facilmente compreendida analisando-se o comportamento do circuito mostrado na **Fig.18**, quando sujeito a variações térmicas.

A partir do momento em que a temperatura aumenta, a corrente de coletor I_C tende a aumentar como conseqüência do aumento da corrente de fuga I_{CBO}.

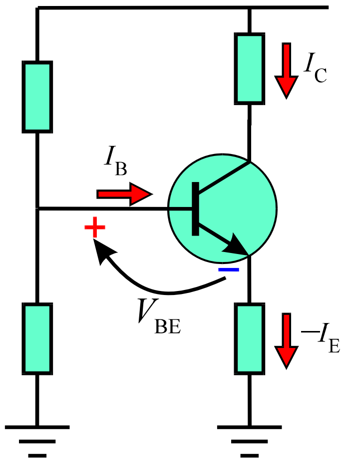


Fig.18 Circuito transistorizado com base polarizada por divisor de tensão.

$T\uparrow \;\Rightarrow\; I_{CBO}\uparrow \;\Rightarrow\; I_C\uparrow$

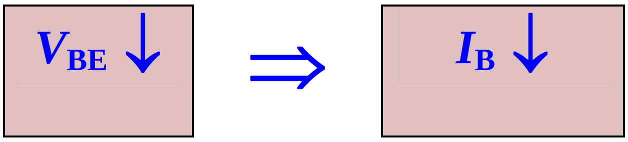
A modificação produzida em I_C aumenta a corrente I_E, visto que $I_E \approx I_C$, que por sua vez provoca um acréscimo na tensão $V_E = R_E I_E$.

$I_C\uparrow \;\Rightarrow\; I_E\uparrow \;\Rightarrow\; V_E\uparrow$

Da **Eq.(6)** verifica-se que a tensão V_{BE} diminui com o aumento da tensão V_E, para um valor fixado da tensão V_B do divisor.

$V_E\uparrow \;\Rightarrow\; V_{BE}\downarrow$

Com base na curva característica mostrada na **Fig.14**, essa diminuição na tensão V_{BE} provoca um decréscimo na corrente de base I_B.



A redução em I_B provoca uma diminuição na corrente I_C. Esse processo de compensação se repete até que a corrente de coletor atinja o valor estabelecido inicialmente. Dessa forma o circuito é praticamente insensível às variações de temperatura.

A **Fig.19** mostra a seqüência de eventos que compõem o processo de estabilidade térmica de um circuito transistorizado com polarização de base por divisor de tensão.

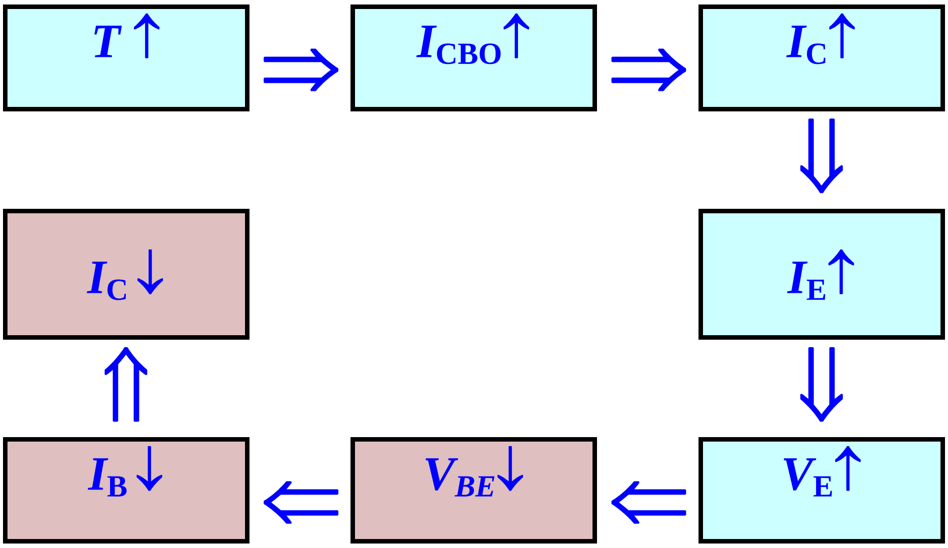


Fig.19 Seqüência de eventos que provocam a estabilização térmica de um circuito transistorizado com polarização de base por divisor de tensão.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Quais são os elementos básicos que compõem um circuito transistorizado com base polarizada por divisor de tensão?

2. Qual a finalidade do divisor de tensão nesses tipos de circuito?

3. Qual a finalidade do resistor R_E nesses circuitos?

4. Repita o **Exemplo 1** para o caso I_C = 6 mA.

5. Na análise de um circuito transistorizado polarizado por divisor de tensão:

   (a) quais são os parâmetros de entrada?

   (b) quais são os parâmetros da malha do coletor?

   (c) quais são os parâmetros de saída?

6. Qual a principal característica térmica de um circuito transistorizado polarizado por divisor de tensão?

7. Calcule o fator de estabilidade térmica de um circuito transistorizado polarizado por divisor de tensão com os seguintes parâmetros: R_E = 100 Ω, R_{B1} = 8,5 kΩ, R_{B2} = 1,5 kΩ, β = 100.

BIBLIOGRAFIA

CIPELLI, Antônio Marco Vicari & SANDRINI, Valdir João. Teoria do desenvolvimento de Projetos de Circuitos Eletrônicos . 7.ed. São Paulo, Érica, 1983. 580p.

MILLMAN, Jacob & HALKIAS, Christos C. Eletrônica: Dispositivos e circuitos. Trad. Elédio José Robalinho e Paulo Elyot Meirelles Villela. São Paulo, Mc Graw Hill do Brasil. 1981. il. v.2

SENAI/ Departamento Nacional. Reparador de circuitos eletrônicos; eletrônica básica II. Rio de Janeiro, Divisão de Ensino e Treinamento, c 1979. (Coleção Básica Senai, Módulo 1).

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Introdução

A partir da descoberta do transistor, sua utilização difundiu-se muito rapidamente. O grande número de vantagens que o transistor apresentava em relação à válvula fez que em muito pouco tempo aquele componente semicondutor fosse largamente utilizado na maioria dos circuitos eletrônicos.

Uma aplicação importante do transistor refere-se ao seu uso na regulação de fontes de alimentação. Essa é uma técnica largamente utilizada na maioria dos circuitos eletrônicos em uso hoje em dia.

Este fascículo tratará do princípio de funcionamento das fontes reguladas a transistor e também do uso de dissipadores de calor, visando a capacitar o leitor a utilizar, montar e reparar fontes reguladas a transistor.

Para a boa compreensão do conteúdo e desenvolvimento das atividades contidas neste fascículo, o leitor deverá estar familiarizado com os conceitos relativos a:

- Filtros em fontes de alimentação.
- Regulação de tensão a diodo Zener.
- Transistor bipolar: relação entre parâmetros de circuito.

Regulação de tensão em fontes de alimentação

A necessidade de projetar e montar fontes reguladas de boa qualidade provém do fato de as fontes não reguladas nem sempre atenderem aos requisitos exigidos na maioria das aplicações. Existem fundamentalmente duas razões pelas quais as fontes não reguladas são inadequadas em certas aplicações:

Regulação pobre: Como resultado de uma regulação pobre, verifica-se uma variação na tensão de saída quando a carga é alterada. A influência de uma regulação pobre no desempenho de uma fonte *cc* pode ser observada através de dois gráficos: um correspondente a uma fonte ideal e o outro, a uma fonte real, conforme ilustrado na **Fig.1**.

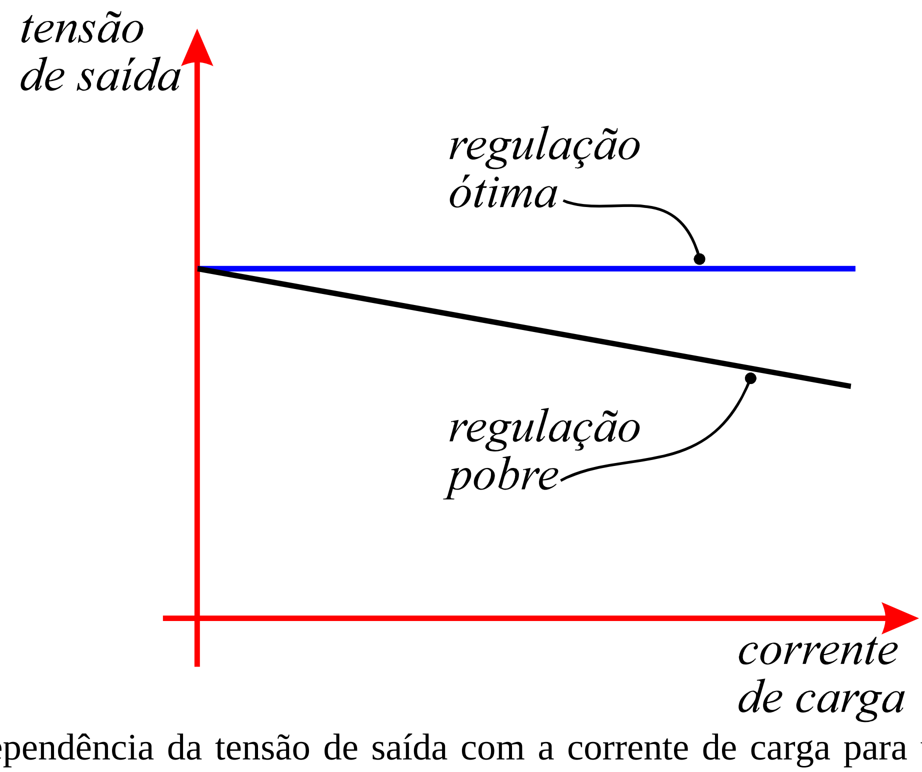


Fig.1 Dependência da tensão de saída com a corrente de carga para uma fonte ideal e uma fonte real.

Estabilização pobre: Nas fontes não reguladas, a tensão de saída acompanha as variações na tensão de entrada, conforme ilustrado na **Fig.2**.

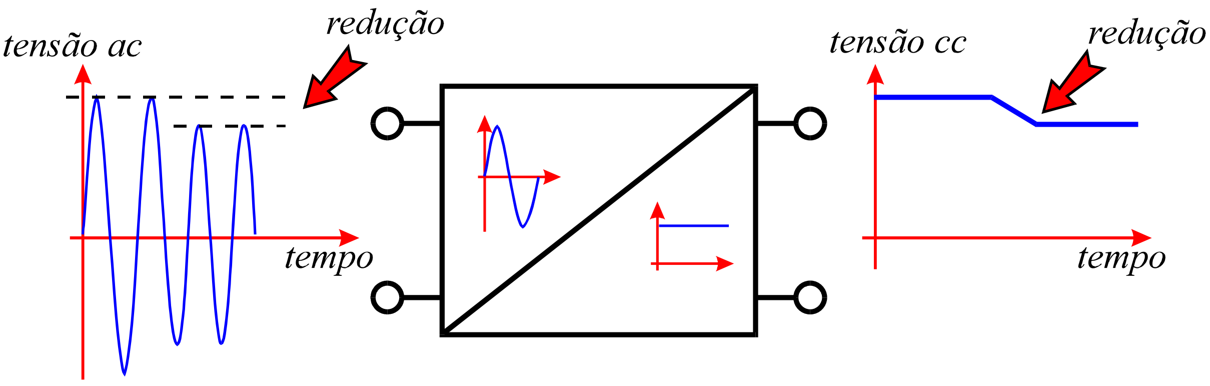


Fig.2 Redução na tensão de saída provocada por uma redução no nível de entrada.

A finalidade de um regulador de tensão é melhorar o desempenho das fontes de alimentação, fornecendo um valor preestabelecido de tensão na saída, independentemente das variações na corrente de carga ou no nível da tensão *ca*, como mostrado na **Fig.3**.



Fig.3 Efeito de um circuito regulador sobre a tensão de saída de uma fonte retificada.

É importante considerar que não existe um sistema regulador de tensão perfeito. As variações na tensão de entrada sempre provocam pequenas alterações na tensão de saída. Os sistemas reguladores devem funcionar de tal forma que a variação na tensão de saída seja a menor possível.

Circuitos reguladores

Os circuitos reguladores são classificados em dois grupos, segundo a posição do elemento regulador em relação à carga. Um dos grupos é denominado de **regulador paralelo**, pois o elemento regulador é disposto em paralelo com a carga, conforme ilustrado na **Fig.4**. Um exemplo típico de um circuito pertencente a esse grupo é o regulador a diodo Zener.

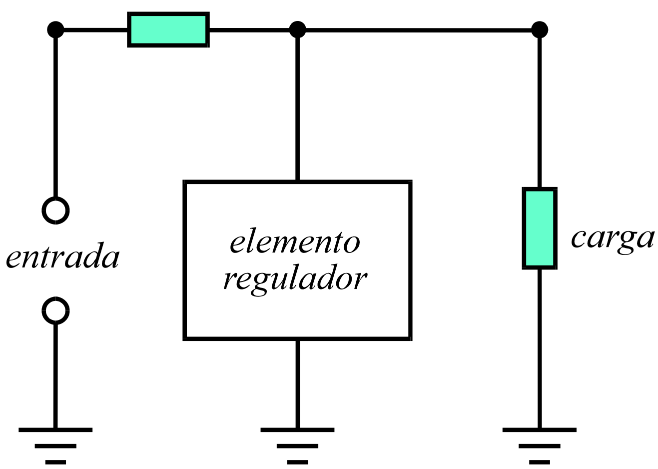


Fig.4 Modelo de um regulador paralelo.

O segundo grupo, denominado de **regulador série**, corresponde a uma configuração em que o elemento regulador fica disposto em série com a carga, como mostrado na **Fig.5**.

Como ilustrado na **Fig.5**, na regulação série, variações na tensão de entrada são transferidas para o elemento regulador, com a tensão de saída permanecendo praticamente constante.

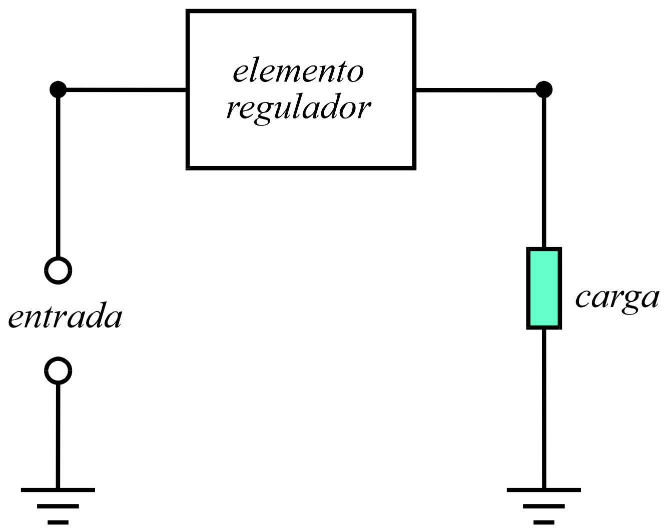


Fig.5 Modelo de um regulador série.

REGULAÇÃO SÉRIE COM TRANSISTOR

Os reguladores de tensão do tipo série com transistor são largamente empregados na alimentação de circuitos eletrônicos por apresentarem uma boa capacidade de regulação. Na **Fig.6** está apresentado o modelo mais simples de um regulador série a transistor.

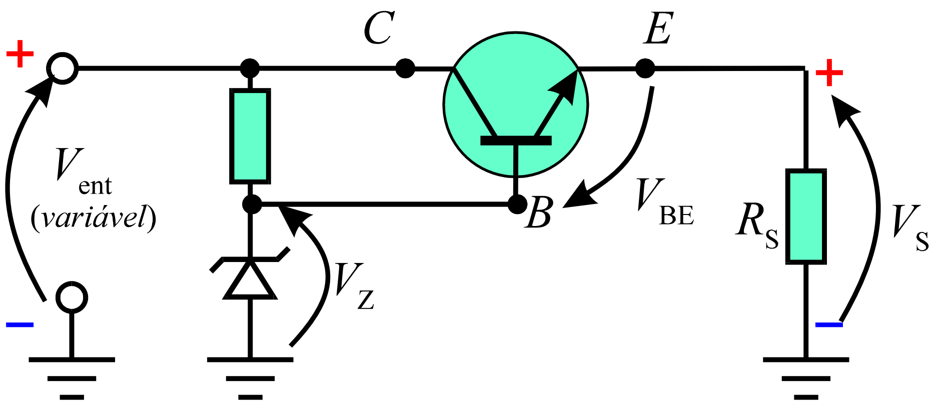


Fig.6 Modelo simples de um regulador série a transistor.

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O princípio de funcionamento do regulador série a transistor pode ser compreendido analisando-se as tensões nos vários elementos do circuito mostrado na **Fig.7**. Como pode ser aí observado, a associação diodo Zener/resistor, conectada à tensão de entrada, permite a obtenção de uma tensão constante V_Z independentemente das variações da tensão de entrada.

A tensão constante do diodo Zener, mostrado na **Fig.7**, é aplicada à base do transistor, ou seja, a tensão de base do transistor é dada por

$$V_B = V_Z \qquad (1)$$

A tensão na carga é relacionada à tensão base-emissor e a tensão na base pela relação

$$V_S = V_Z - V_{BE} \qquad (2)$$

Como mostrado na **Fig.7**, a diferença entre a tensão de entrada e a tensão na carga fica aplicada entre os terminais do coletor e do emissor, ou equivalentemente,

$$V_S = V_{ent} - V_{CE} \tag{3}$$

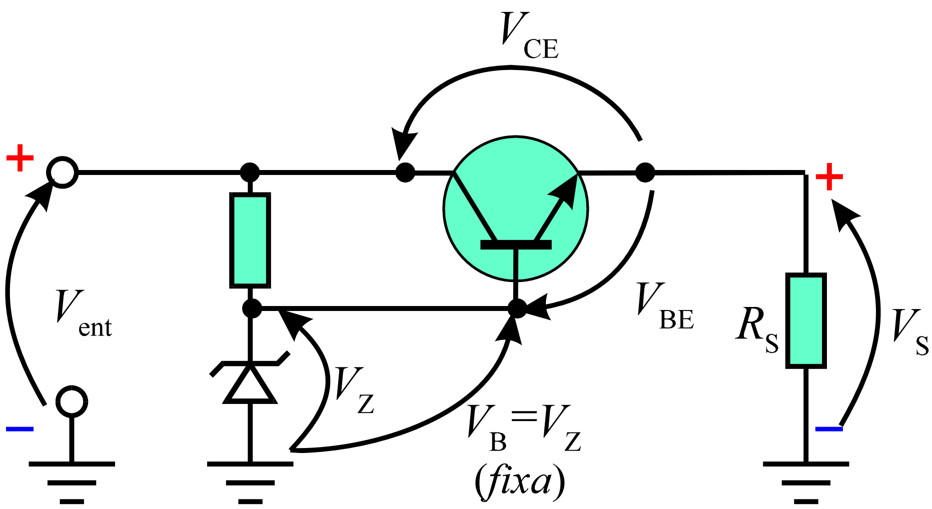


Fig.7 Tensões no regulador série a transistor.

ESTABILIZAÇÃO

No regulador série a transistor, a tensão aplicada à base do transistor corresponde à tensão Zener e pode ser considerada constante. Nessas condições, a tensão na carga também se mantém constante com um valor de 0,2 a 0,7 V inferior à tensão Zener.

Como ilustrado na **Fig.8** as variações na tensão de entrada são assimiladas pelo transistor através de modificações na tensão coletor-emissor. Como pode ser aí observado, a tensão de entrada é sempre superior à tensão de saída. Essa condição é necessária pois garante que a tensão coletor-emissor do transistor possa variar sem alterar a tensão de saída do circuito. Em geral, a tensão de entrada é aproximadamente 50% superior à tensão regulada na saída.

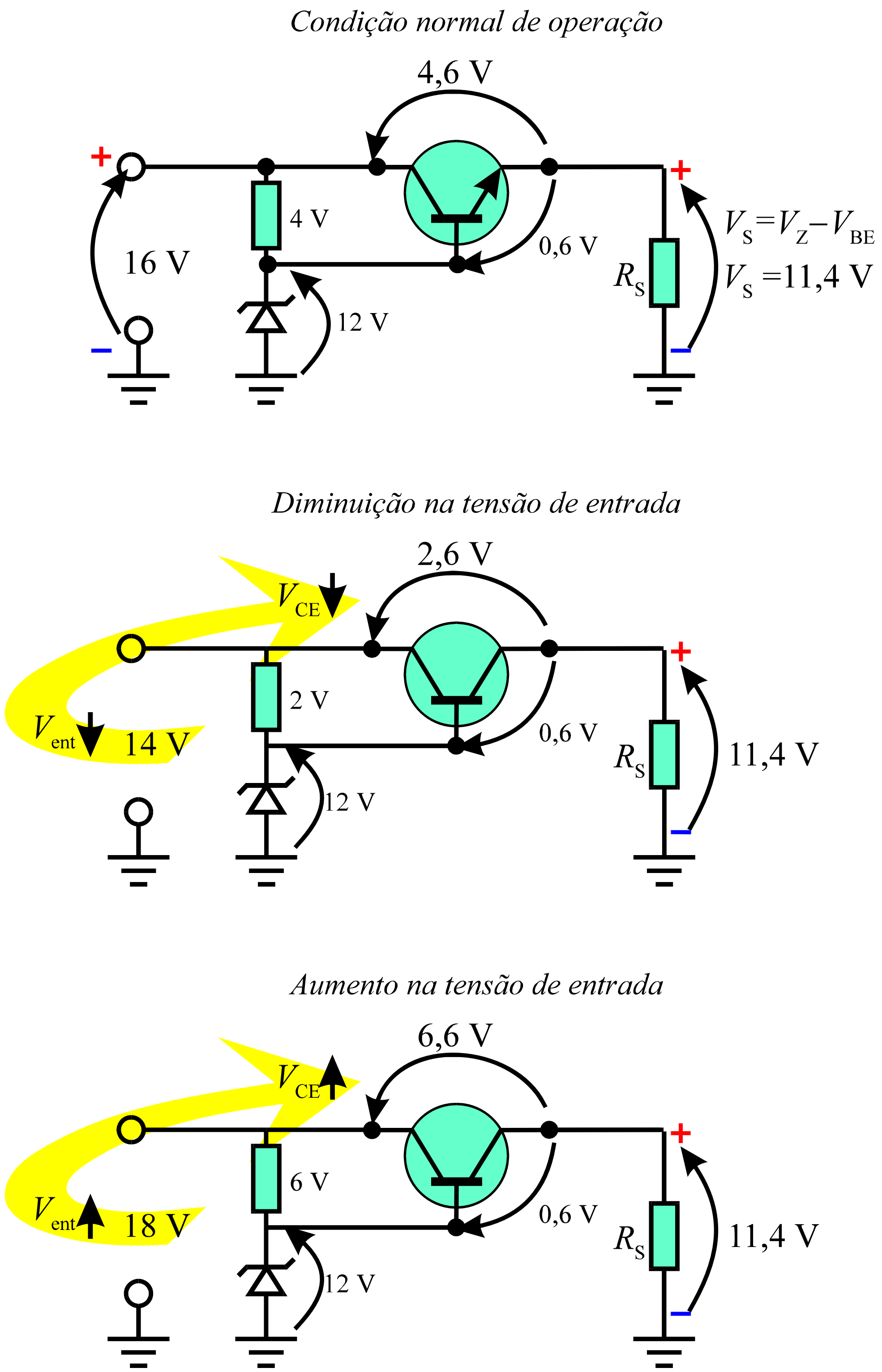


Fig.8 Exemplo ilustrando as modificações nas tensões no regulador decorrentes de variações na tensão de entrada.

REGULAÇÃO

A observação do comportamento das correntes do circuito permite analisar a forma como o regulador reage às variações na corrente de carga.

As correntes do circuito regulador estão mostradas na **Fig.9**, onde se considera que a corrente de carga esteja inicialmente em um valor I_S. Considera-se que a corrente de coletor seja igual à corrente de carga, devido à aproximação

$$I_S = I_E \approx I_C$$

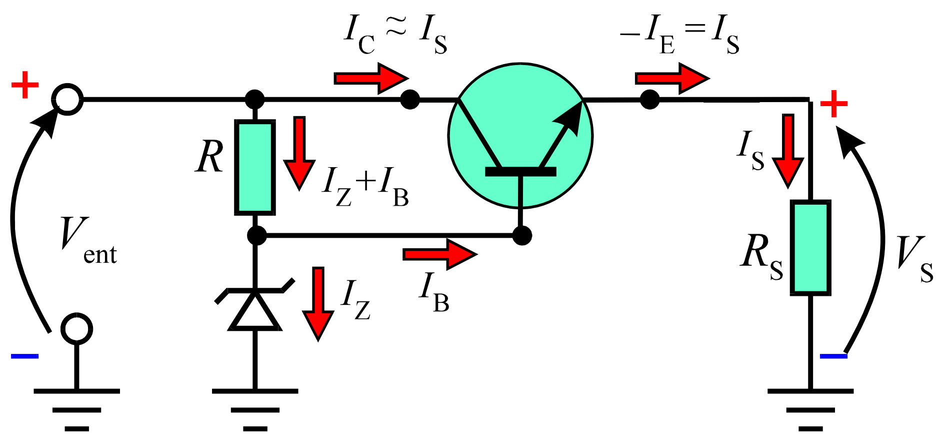


Fig.9 Correntes no regulador série a transistor.

Como se pode observar na **Fig.9**, a corrente de base necessária para que o transistor forneça a corrente de carga é obtida da combinação resistor/diodo Zener. Qualquer modificação no valor da carga altera a corrente de coletor o que produz uma variação na corrente de base na mesma proporção.

$I_S \uparrow \Rightarrow I_C \uparrow \Rightarrow I_C/\beta = I_B \uparrow$

$I_S \downarrow \Rightarrow I_C \downarrow \Rightarrow I_C/\beta = I_B \downarrow$

Fixando-se o valor da tensão de entrada V_{ent}, a corrente no resistor R da **Fig.9**

$$I_R = \frac{V_{ent} - V_Z}{R} \qquad (4)$$

permanece fixa, devido ao valor constante da tensão V_Z. Da **Fig.9** tem-se que

$$I_R = I_B + I_Z \qquad (5)$$

e as variações em I_B e I_Z ocorrem em sentidos opostos de forma a manter I_R no seu valor constante.

$$I_B \uparrow \;\Rightarrow\; I_Z \downarrow \;\Rightarrow\; I_S = cte.$$

$$I_B \downarrow \;\Rightarrow\; I_Z \uparrow \;\Rightarrow\; I_S = cte.$$

Dessa forma, cabe ao diodo Zener liberar mais ou menos corrente para a base do transistor de forma a manter a corrente de carga constante.

Verifica-se que no regulador série, a condição fundamental para manter a tensão de saída constante é o efeito regulador do diodo Zener. A tensão sobre o diodo deve manter-se no valor V_Z independentemente de variações na carga ou na tensão de entrada.

DIODO COMPENSADOR

A tensão de saída no regulador série pode ser obtida da **Eq.(2)**, que está reproduzida a seguir:

$$V_S = V_Z - V_{BE} \qquad (2)$$

A **Eq.(2)** mostra que a tensão de saída é sempre inferior à tensão Zener por uma quantidade igual à tensão base-emissor. Para compensar esse decréscimo na tensão de saída, é prática comum adicionar um **diodo compensador**, diretamente polarizado, em série com o diodo Zener, como mostrado na **Fig.10**.

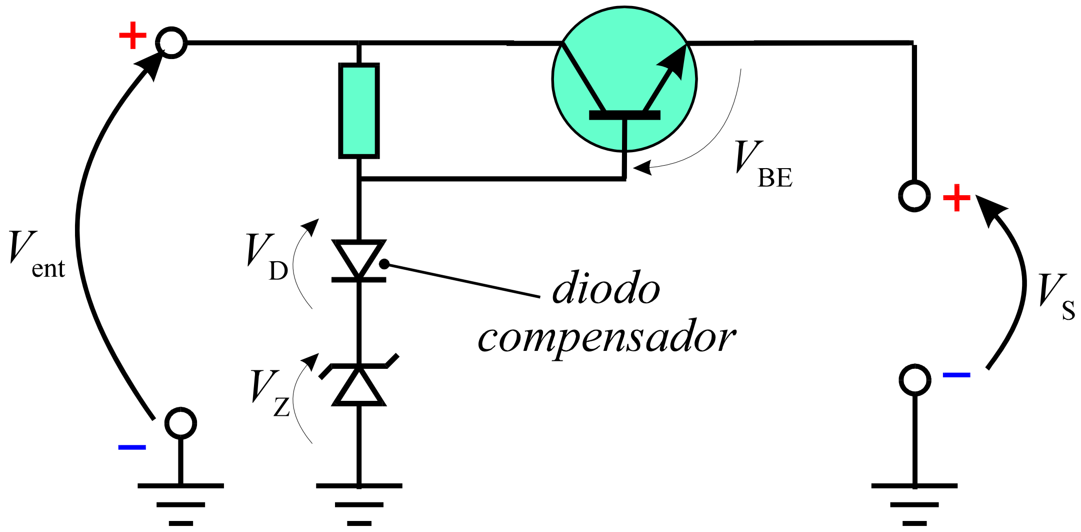


Fig.10 Regulador série com diodo compensador.

Com a adição do diodo, a tensão aplicada à base do transistor torna-se

$$V_B = V_Z + V_D \tag{6}$$

onde V_D é a queda de tensão no diodo diretamente polarizado. A tensão de saída nessa nova configuração torna-se

$$V_S = V_Z + V_D - V_{BE} \tag{7}$$

Sendo o diodo constituído do mesmo semicondutor utilizado na fabricação do transistor, tem-se que

$$V_D - V_{BE} = 0$$

e a **Eq.(7)** fornece

$$V_S = V_Z \tag{8}$$

Dissipação de potência no regulador série

Os reguladores de tensão sempre apresentam elementos que dissipam potência em forma de calor. No circuito regulador série a transistor, o elemento responsável pela maior porção da potência dissipada é o transistor.

Dado que a potência dissipada no transistor pode ser obtida da expressão aproximada

$$P_C = V_{CE} I_C \qquad (9)$$

com base na **Eq.(3)** e na aproximação $I_C \approx I_S$, tem-se que

$$P_C = (V_{ent} - V_S) I_S \qquad (10)$$

Os transistores utilizados nos circuitos reguladores são em geral transistores de potência, dimensionados de forma que a dissipação real não provoque o **disparo térmico** que produz a danificação do componente.

ENCAPSULAMENTO

Os componentes semicondutores de um circuito dissipam potência nas junções em forma de calor. Em muitos casos a quantidade de calor gerada nas junções chega a provocar uma elevação de temperatura considerável no encapsulamento externo do componente. Para evitar a destruição do dispositivo, é muito importante que as temperaturas nas junções não atinjam a temperatura de fusão do material semicondutor.

A temperatura das junções de um dispositivo semicondutor depende fundamentalmente da relação:

Quantidade de calor gerada nas junções ⇔ **Quantidade de calor transferida para o ambiente externo**

Quando a quantidade de calor gerada nas junções é **totalmente** transferida, através do encapsulamento, para o ambiente externo, a temperatura das junções mantém-se estável.

Calor gerado = **Calor transferido** ⇒ **Temperatura estável**

Se, no entanto, a quantidade de calor transferida para o ambiente externo for **menor** que aquela gerada nas junções, existirá uma elevação de temperatura no material semicondutor.

Calor gerado > **Calor transferido** ⇒ **Elevação de temperatura**

Devido aos efeitos provenientes da geração de calor, o encapsulamento do dispositivo tem grande importância, pois é através dele que o calor é escoado das junções para o ambiente externo.

O material utilizado na fabricação do encapsulamento sempre apresenta uma certa oposição ao fluxo de calor. Um parâmetro utilizado para avaliar esse grau de oposição é o que se denomina de **resistência térmica** do material.

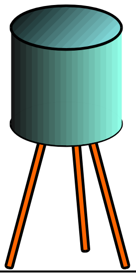
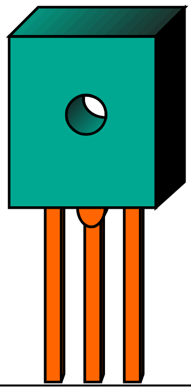
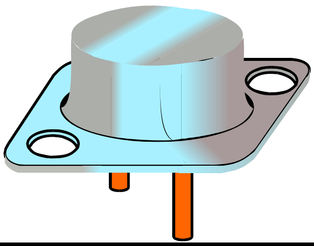
Resistência térmica é um parâmetro que mede o grau de oposição ao fluxo de calor através do material.

A resistência térmica é representada pelo parâmetro R_{th} e medida em unidades de °C/W (grau centígrado por Watt).

Quanto menor for a resistência térmica do encapsulamento entre a junção geradora de calor e o meio ambiente, mais facilmente o calor será dissipado. Por essa razão, os transistores de potência são fabricados com encapsulamento metálico, de baixa resistência térmica.

A **Tabela 1** lista alguns tipos comuns de encapsulamentos, juntamente com suas características físicas e térmicas. O parâmetro R_{thja} na terceira coluna da **Tabela 1** representa a resistência térmica entre a junção e o ambiente externo.

Tabela 1 Tipos comuns de encapsulamentos e suas características.

Encapsulamento	Características	R_{thja} (°C/W)	Transistor
TO–1	• Corpo cilíndrico metálico 	290	AC188
TO–126	• Corpo plástico • Uma face metálica 	110	BD135
TO-3	• Corpo metálico ligado eletricamente ao coletor 	6	2N3055

DISSIPADORES DE CALOR

Os dissipadores de calor são dispositivos metálicos acoplados aos dispositivos semicondutores com o objetivo de facilitar a transferência de calor do interior do componente para o ambiente externo. A **Fig.11** mostra o aspecto de um dissipador e a forma de acoplamento a um transistor de corpo cilíndrico.

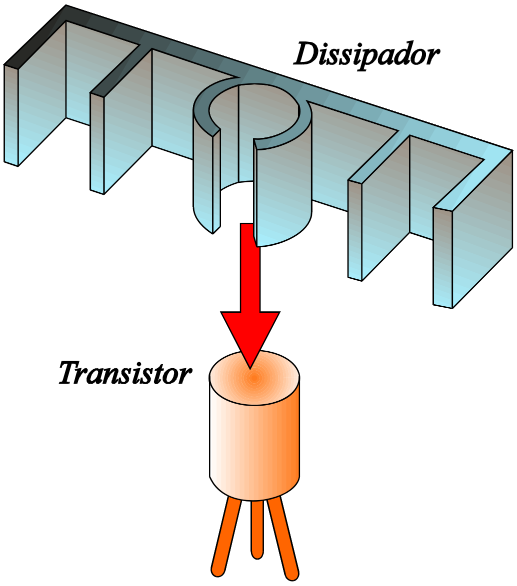


Fig.11 Dissipador para acoplamento a um transistor de corpo cilíndrico.

O dissipador reduz a resistência térmica entre a junção e o meio-ambiente, possibilitando assim operar o dispositivo semicondutor a uma potência mais elevada que aquela limitada pelo encapsulamento do componente.

O transistor AC188, por exemplo, apresenta uma resistência térmica de 290 °C/W entre a junção e o ambiente externo. Utilizando-se um dissipador acoplado ao corpo do transistor, conforme mostrado na **Fig.12**, a área de transferência de calor entre o componente e o ambiente externo aumenta. Esse aumento de área provoca uma redução substancial da resistência térmica entre a junção e o ambiente externo.

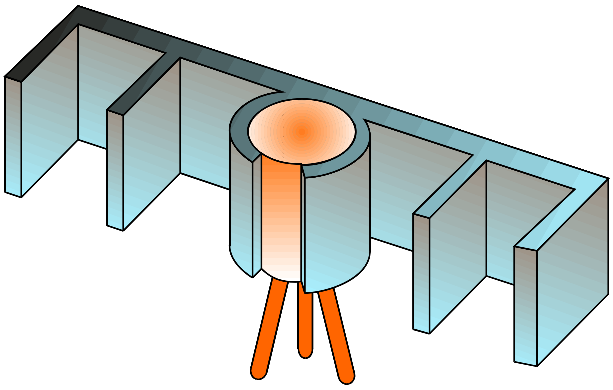


Fig.12 Transistor de corpo cilíndrico com dissipador de calor.

Usando essa técnica, a resistência térmica do transistor AC188 pode diminuir para um valor de até 70 °C/W. Essa redução permite que o transistor possa operar a um nível de potência até quatro vezes superior àquele permitido na ausência do dissipador, sem que isso provoque uma maior elevação de temperatura do componente.

MONTAGEM DO TRANSISTOR NO DISSIPADOR

Existe no comércio uma grande variedade de formas e dimensões de dissipadores, com uma ampla gama de valores de resistência térmica. A **Fig.13** mostra um tipo comum de dissipador, para fixação do transistor TO-3.

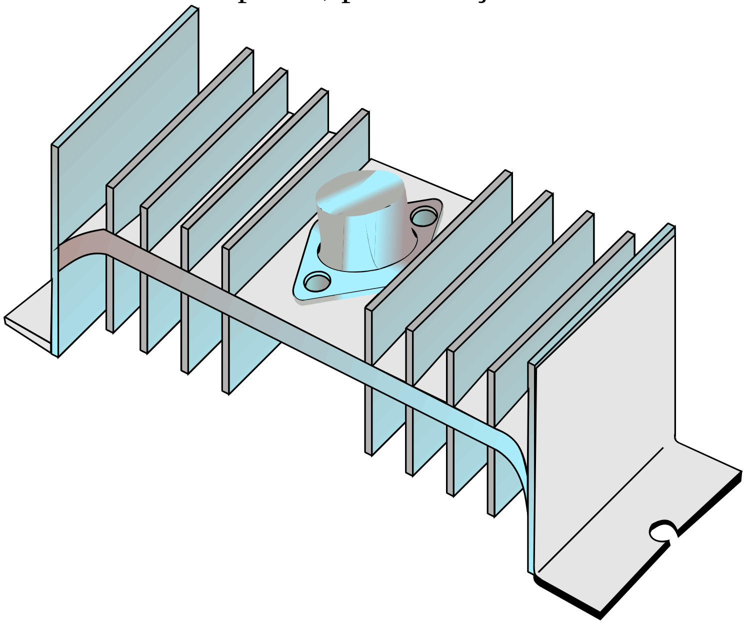


Fig.13 Dissipador para fixação do transistor TO-3.

No caso de transistores com coletor em contato elétrico com o encapsulamento, as duas situações seguintes devem ser consideradas:

Encapsulamento em contato elétrico com o dissipador

Essa situação pode ocorrer se o dissipador estiver isolado eletricamente do circuito e o transistor pode ser afixado diretamente ao dissipador, na forma mostrada na **Fig.14**.

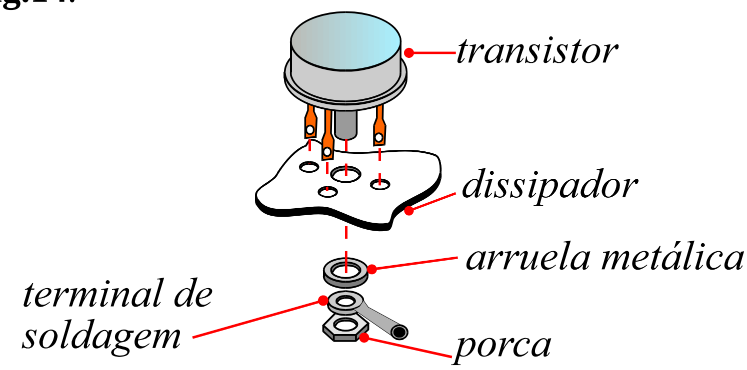


Fig.14 Forma de fixação de um transistor a um dissipador que esteja isolado eletricamente do circuito.

Encapsulamento isolado eletricamente do dissipador

Quando for necessário isolar eletricamente o transistor do dissipador, utiliza-se um isolante elétrico delgado de mica que, dependendo de quão fina seja a espessura utilizada, pode apresentar uma resistência térmica tipicamente baixa entre 2 e 4 °C/W. Devem-se também utilizar arruelas de passagem isolantes para evitar o contato elétrico dos parafusos de fixação ao dissipador. A **Fig.15** mostra em detalhes a forma de fixação do transistor TO-3 ao dissipador para obtenção de isolação elétrica entre os dois componentes.

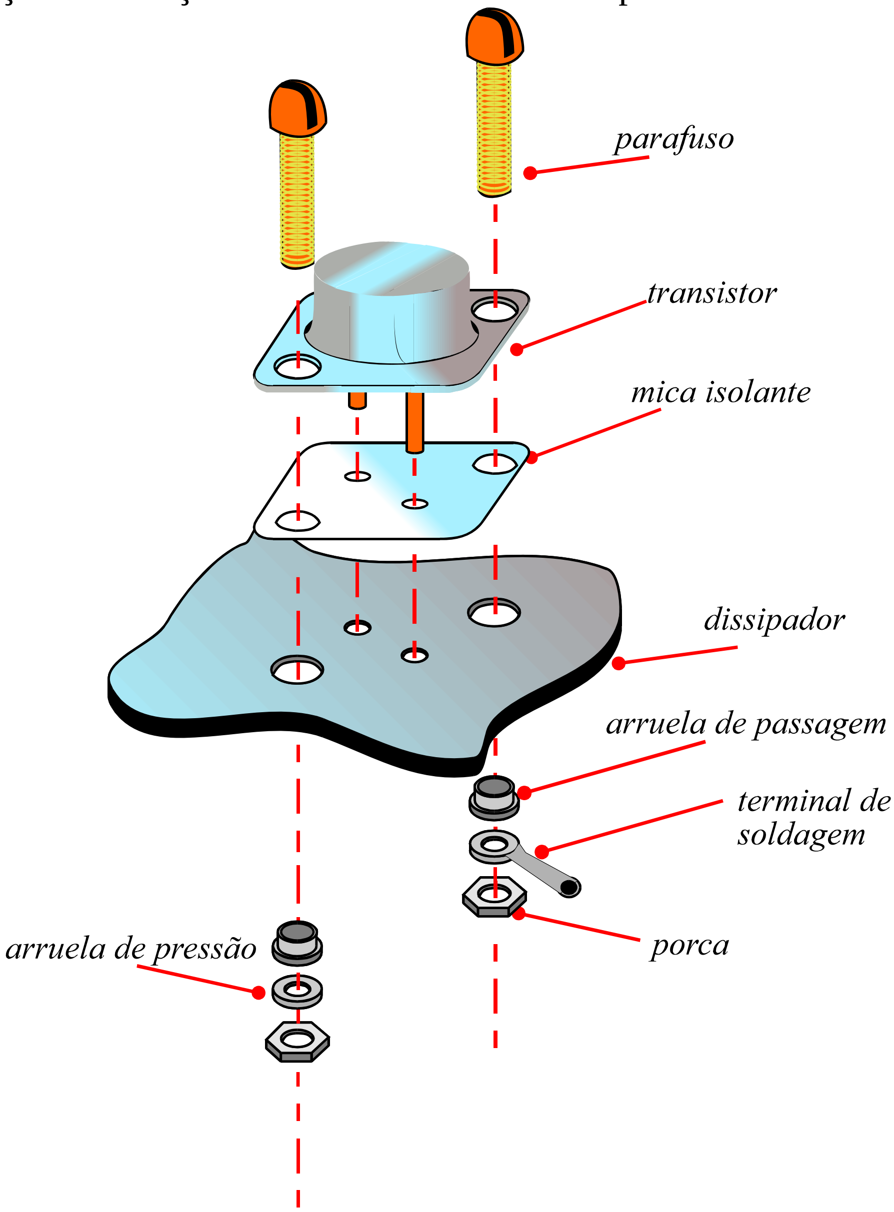


Fig.15 Forma de fixação de um transistor a um dissipador com uma lâmina intermediária de mica para evitar o contato elétrico entre os componentes.

OTIMIZAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Algumas providências podem ser tomadas para otimizar-se a transferência de calor entre a junção semicondutora e o ambiente externo, tais como:

- Estabelecer a maior área de contato possível entre o componente semicondutor e o dissipador.
- Afixar firmemente o componente ao dissipador, através de parafusos.
- Untar as regiões de contato entre componente e mica e entre mica e dissipador utilizando graxa de silicone, eliminando possíveis bolhas de ar que aumentam a resistência térmica.
- Usar dissipadores enegrecidos.
- Aumentar a área do dissipador.
- Posicionar o dissipador de forma que na montagem final as aletas fiquem orientadas na posição vertical.
- Utilizar refrigeração forçada, através de ventiladores, ou circulação de água ou óleo no interior do dissipador.
- Afastar os dissipadores e os dispositivos semicondutores de elementos que também sofram aquecimento, tais como transformadores e resistores de potência.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Qual a principal finalidade de um regulador em uma fonte de alimentação?
2. Que componente pode ser empregado para se fazer um regulador paralelo?
3. No regulador série transistorizado como se comporta a corrente no diodo Zener perante variações na corrente de carga?
4. Qual a função do diodo compensador em um regulador série transistorizado?
5. Qual a finalidade dos dissipadores de calor acoplados a componentes semicondutores?
6. Cite cinco providências que devem ser tomadas para otimizar a transferência de calor entre um componente semicondutor e o ambiente externo.

BIBLIOGRAFIA

CIPELLI, Antônio Marco Vicari & SANDRINI, Valdir João. Teoria do desenvolvimento de Projetos de Circuitos Eletrônicos . 7.ed. São Paulo, Érica, 1983. 580p.

FIGINI, Gianfranco. Eletrônica Industrial: Circuitos e aplicações. São Paulo, Hemus, 1982.

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Introdução

A utilização do transistor como elemento regulador na construção de fontes de alimentação estabilizadas levou ao desenvolvimento de circuitos destinados a melhoria do desempenho daqueles equipamentos. Um dos resultados obtidos como fruto desse desenvolvimento foi a concepção do circuito comparador transistorizado.

Este fascículo trata do circuito comparador transistorizado, e contém uma descrição de sua configuração e princípio de operação, visando a capacitar o leitor a compreender o funcionamento das fontes reguladas com comparador.

Para a boa compreensão do conteúdo e desenvolvimento das atividades contidas neste fascículo, o leitor deverá estar familiarizado com os conceitos relativos a:

- Diodo Zener.
- Transistor bipolar: relação entre parâmetros de circuito.

Circuitos comparadores transistorizados

Os comparadores são circuitos eletrônicos que recebem uma amostra de sinal, comparam essa amostra com um valor de referência e produzem, na sua saída, um sinal proporcional à diferença entre o sinal de amostra e o sinal de referência, conforme ilustrado na **Fig.1**.

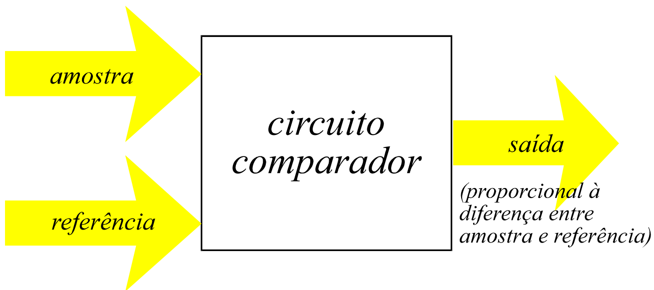


Fig.1 Modelo simplificado de um circuito comparador.

Os circuitos comparadores são muito utilizados em fontes de alimentação.

ELEMENTOS DO CIRCUITO COMPARADOR

Um circuito comparador pode ser implementado com o uso de um transistor ligado na configuração emissor comum, conforme mostrado na **Fig.2**.

O **sinal de referência** necessário para o funcionamento do circuito comparador consiste em uma fonte de tensão constante.

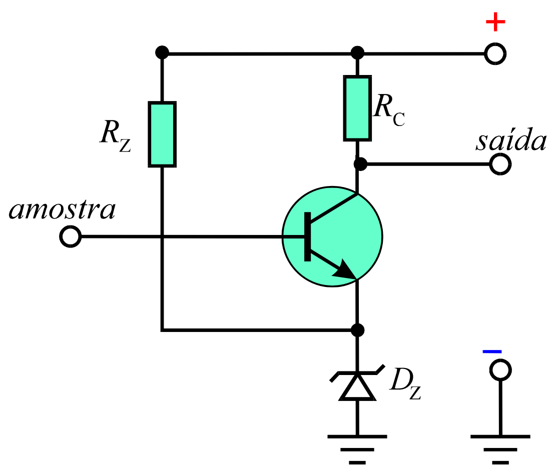


Fig.2 Circuito comparador transistorizado.

Como mostrado na **Fig.3**, o diodo Zener fornece uma tensão constante ao emissor do transistor. A tensão do emissor naquela configuração corresponde ao sinal de referência do circuito.

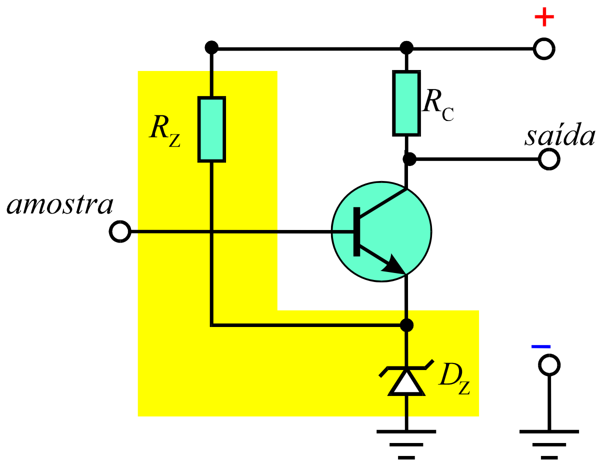


Fig.3 A região delimitada do circuito fornece a referência do comparador.

A **amostra** é geralmente fornecida ao circuito comparador por um divisor de tensão resistivo, como indicado na **Fig.4**.

Pela própria característica de funcionamento do divisor de tensão, a amostra é uma réplica da forma de onda do sinal.

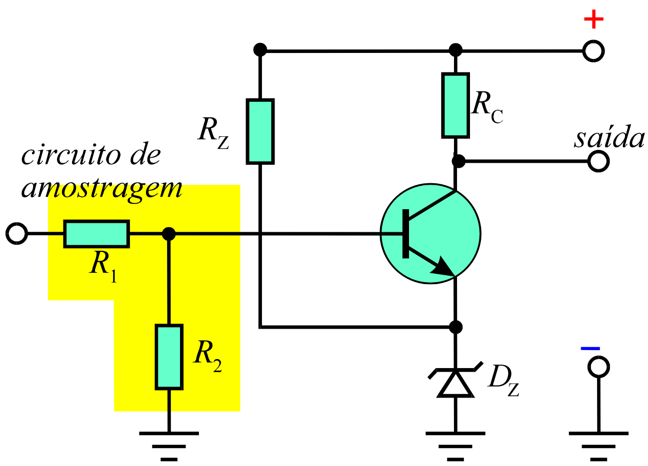


Fig.4 A região delimitada do circuito fornece a amostra do sinal.

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

A operação do circuito comparador baseia-se na variação da tensão base-emissor do transistor provocada pela variação do sinal de amostra.

No circuito da **Fig.5**, a tensão do emissor tem sempre o valor de referência fixado pelo diodo Zener, de forma que a tensão base-emissor do transistor

$$V_{BE} = V_{am} - V_Z \quad (1)$$

dependa apenas da tensão aplicada à base, esta última representando o sinal de amostra.

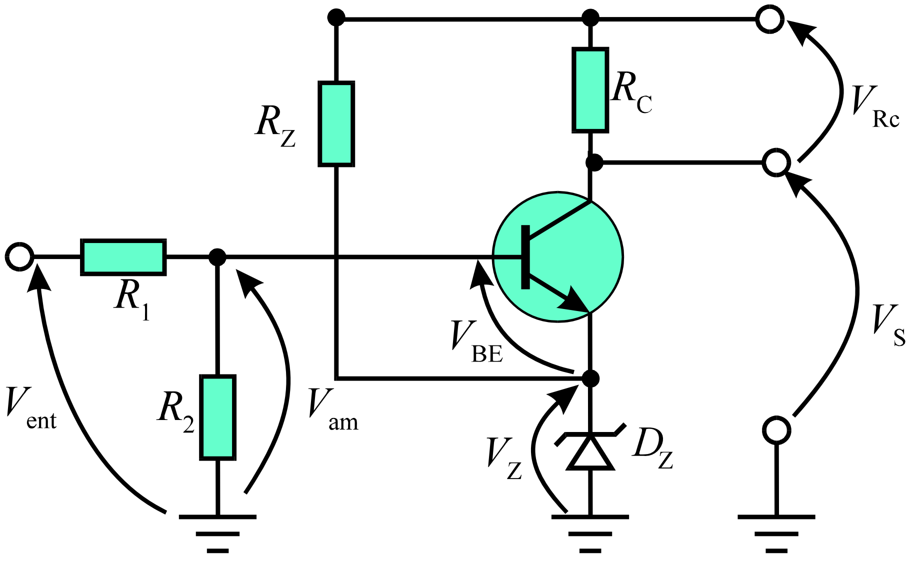
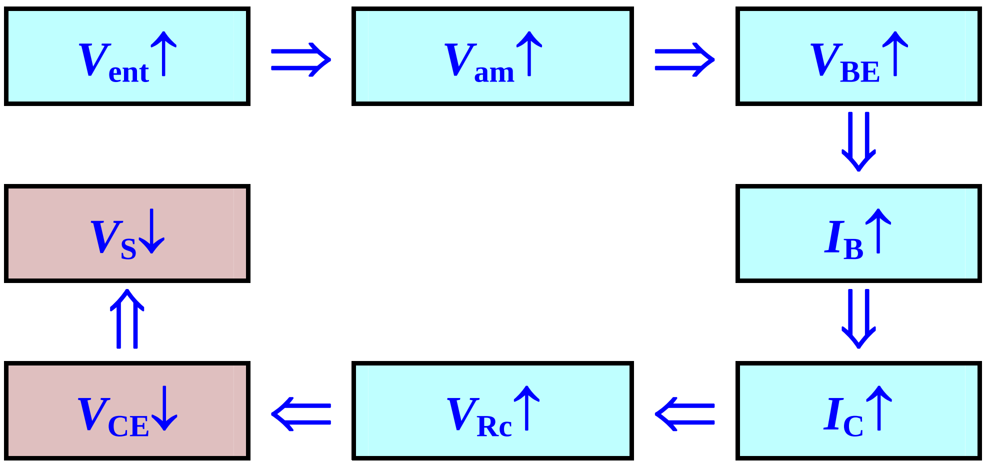


Fig.5 Parâmetros elétricos do circuito comparador.

A tensão na saída do circuito comparador V_S depende da tensão base-emissor do transistor. Se a tensão no ponto onde é feita a tomada da amostra sofre, por exemplo, um pequeno aumento, ocorre a seguinte seqüência de eventos no comparador:



Devido ao alto ganho do transistor, uma pequena elevação na amostra do sinal provoca uma grande redução na tensão de saída do circuito.

Se por outro lado, a amostra do sinal sofre uma pequena redução, isso provoca um grande aumento na tensão de saída do circuito.

Conclui-se portanto que o circuito comparador, além de detectar a variação na amostra do sinal, fornece na saída uma versão **amplificada invertida**, proporcional àquela variação.

COMPARADOR DE ATUAÇÃO INVERSA OU DIRETA

Um circuito comparador pode ser classificado como sendo de atuação direta ou inversa, dependendo da forma como o sinal de saída se comporta em relação ao sinal amostrado.

COMPARADOR DE ATUAÇÃO INVERSA

Um circuito comparador pode ser classificado como de **atuação inversa** quando o sinal de saída varia em sentido oposto à variação do sinal amostrado. Os circuitos comparadores compostos por apenas um transistor são sempre de atuação inversa, como indicado na **Fig.6**.

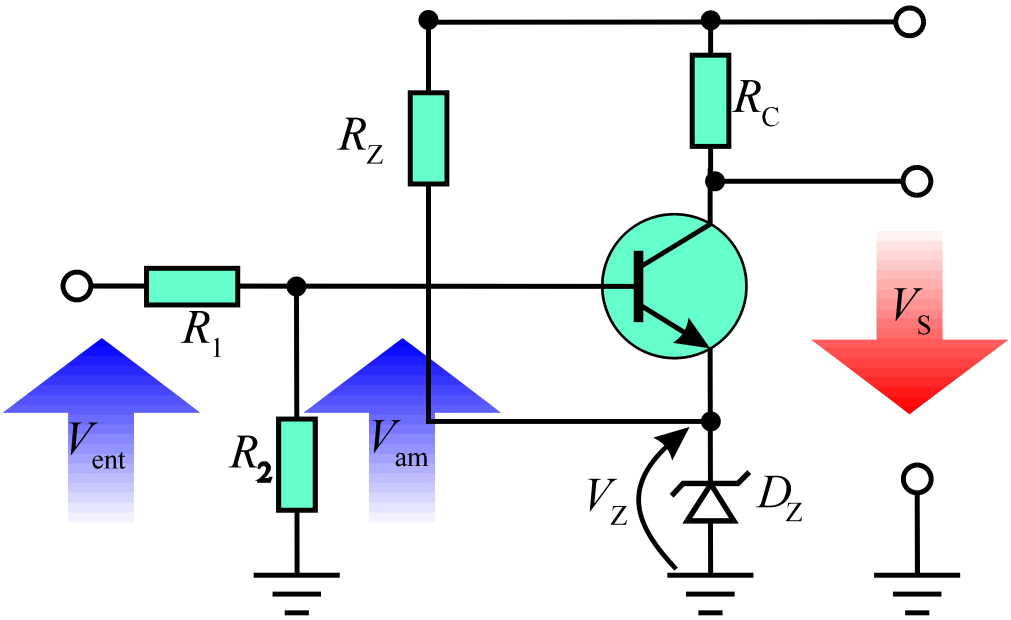


Fig.6 Comparador de atuação inversa.

COMPARADOR DE ATUAÇÃO DIRETA

O comparador de atuação direta fornece um sinal de saída que varia de forma proporcional e no mesmo sentido de variação da amostra do sinal. Esses comparadores são constituídos, normalmente, por circuitos mais complexos. Um dos mais simples comparadores de atuação direta é mostrado na **Fig.7**.

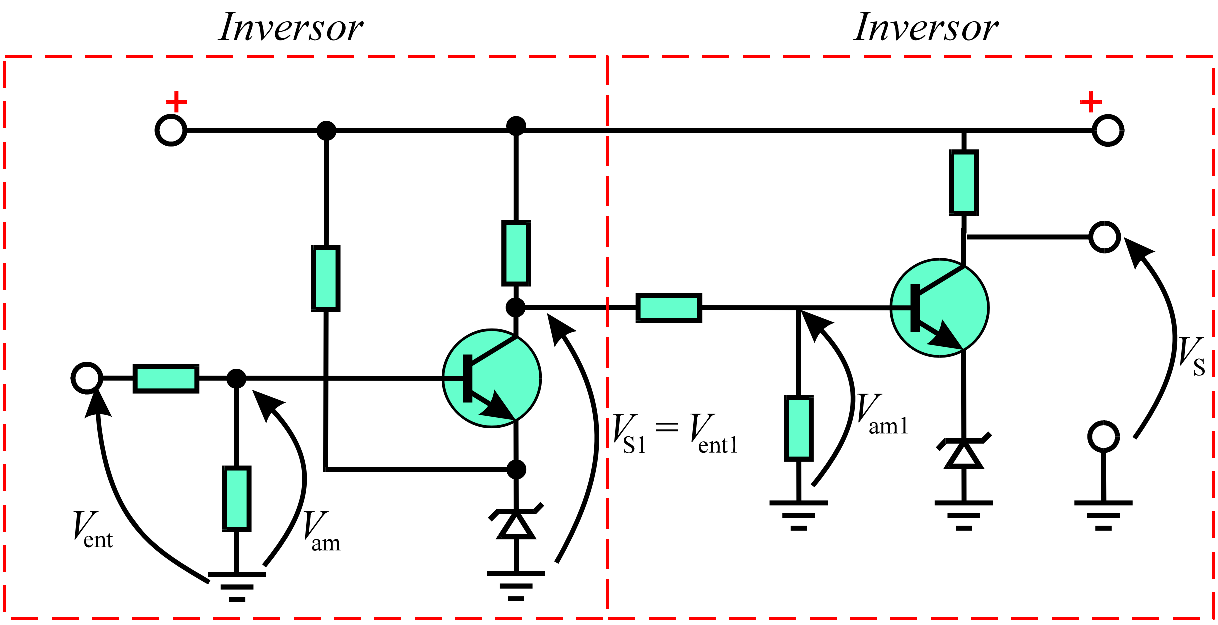


Fig.7 Circuito comparador de atuação direta empregando dois transistores.

O comparador mostrado na **Fig.7** é composto de dois comparadores de atuação inversa, configurados em cascata, de forma que a amostra do sinal V_{am} sofre duas inversões sucessivas para produzir na saída um sinal V_S que varia na **mesma proporção e no mesmo sentido** de variação do sinal de entrada V_{ent}.

O diagrama mostrado na **Fig.8** mostra o princípio de funcionamento do comparador de atuação direta submetido a um aumento no sinal de entrada.

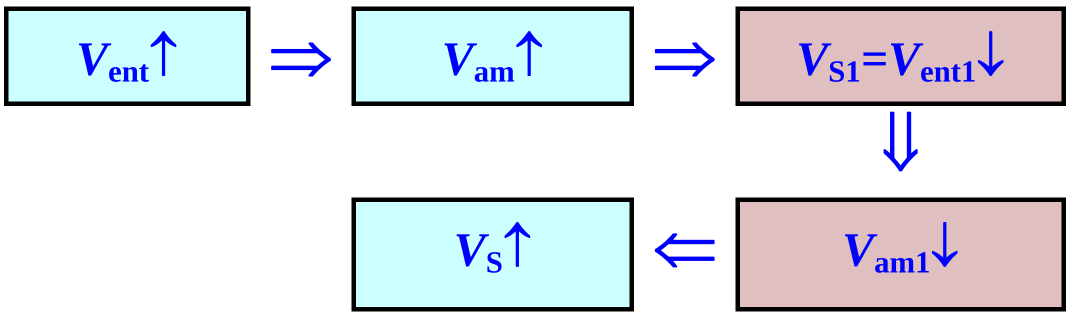


Fig.8 Atuação do comparador da **Fig.7** submetido a um aumento do sinal de entrada.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. O que é um circuito comparador?
2. O que são comparadores de atuação inversa e direta?

BIBLIOGRAFIA

CIPELLI, Antônio Marco Vicari & SANDRINI, Valdir João. Teoria do desenvolvimento de Projetos de Circuitos Eletrônicos . 7.ed. São Paulo, Érica, 1983. 580p.

FIGINI, Gianfranco. Eletrônica industrial; circuitos e aplicações. São Paulo, Hemus, c 1982. 336p.

MILLMAN, Jacob & HALKIAS, Chistos C. Eletrônica: dispositivos e circuitos.
Trad. Elédio Robalinho e Paulo Elyot Meirelles Villela.. São Paulo, Mc Graw Hill do Brasil, 1981. il. v.2

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Introdução

Este fascículo encerra uma etapa importante do estudo de eletrônica. Através do projeto da fonte regulada com comparador, estarão reunidos, em uma única montagem de interesse prático, um circuito retificador, o filtro e o estágio regulador de tensão com comparador.

É importante observar como os circuitos são interconectados, como peças de um quebra-cabeça, formando um conjunto único.

O objetivo deste fascículo é justamente desenvolver no leitor uma habilidade em identificar, em um circuito completo, os **pequenos circuitos** que o compõem. Essa habilidade é indispensável àqueles que desejam fazer a manutenção e o projeto de equipamentos eletrônicos.

Para a boa compreensão do conteúdo e desenvolvimento das atividades contidas neste fascículo, o leitor deverá estar familiarizado com os conceitos relativos a:

- Filtros em fontes de alimentação.
- O diodo Zener como regulador de tensão.
- Regulação de tensão a transistor.
- Circuitos comparadores transistorizados.

Fonte regulada com comparador

A fonte regulada com comparador é um circuito eletrônico destinado a fornecer um valor de tensão contínua constante na saída, quando a corrente de carga e a tensão de entrada variarem entre valores limites preestabelecidos. Uma representação simplificada de uma fonte regulada com comparador está mostrada na **Fig.1**.



Fig.1 Bloco representativo da função de uma fonte regulada.

A fonte regulada com comparador é uma versão mais elaborada dos circuitos reguladores convencionais, sendo utilizada para alimentação de equipamentos que demandem uma alta estabilidade nas tensões de operação.

DIAGRAMA DE BLOCOS

A **Fig.2** mostra o diagrama de blocos completo de uma fonte regulada com comparador.

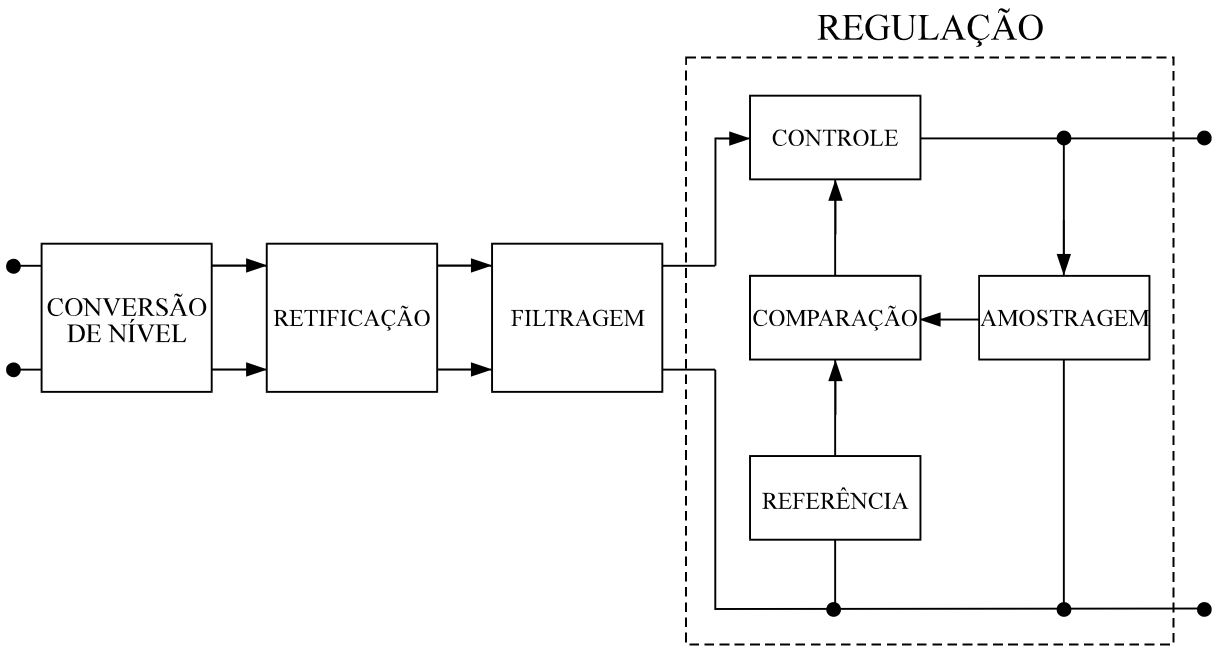


Fig.2 Diagrama de blocos de uma fonte regulada com comparador.

Os três primeiros blocos mostrados na **Fig.2** representam a transformação da tensão alternada da rede em tensão contínua filtrada, e desempenham as seguintes funções:

Conversão de nível: Esse bloco é utilizado para a obtenção do nível de tensão alternada necessário na retificação, a partir das tensões padronizadas das redes elétricas (110V, 220V).

Retificação: Esse bloco faz a transformação de tensão alternada em contínua pulsada. Esse processo é executado com o emprego de diodos, ligados de forma a fornecer uma retificação de meia onda ou de onda completa.

Filtragem: Esse bloco tem por objetivo aproximar a forma de tensão, na saída da retificação, de uma tensão contínua pura.

Os blocos restantes na **Fig.2** compõem o módulo **regulação** e desempenham as seguintes funções:

Referência: Esse bloco representa o componente ou circuito que tem por finalidade fornecer a tensão de referência necessária para o funcionamento do comparador.

Amostragem: A finalidade desse bloco é fornecer uma parcela da tensão de saída ao comparador.

Comparação: Esse bloco compara as tensões de amostra e referência, fornecendo na saída uma tensão proporcional à diferença entre aqueles dois sinais. O circuito comparador atua também como amplificador da diferença entre as tensões da amostra e da referência.

Controle: Representa o transistor regulador, que recebe na base a tensão de saída do comparador e realiza a correção na tensão de saída da fonte.

A compreensão da função desempenhada por cada bloco, bem como a identificação de seus componentes é muito importante, pois facilita a manutenção e reparo da fonte regulada.

DIAGRAMA DE CIRCUITO

A **Fig.3** apresenta o diagrama de circuito correspondente a fonte regulada com comparador.

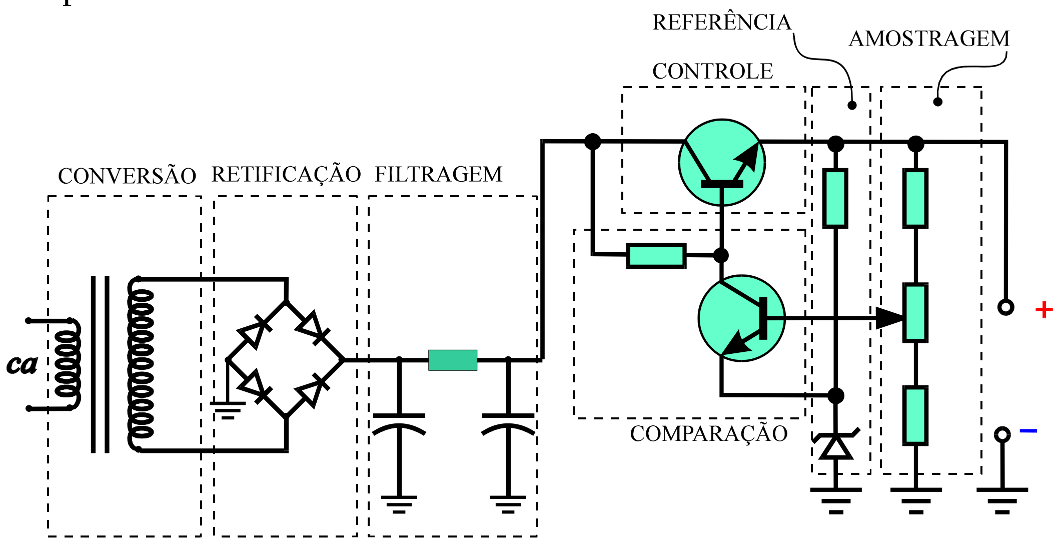


Fig.3 Circuito de uma fonte regulada com comparador.

As funções referentes a **amostragem**, **referência** e **controle** identificadas no diagrama de circuito da **Fig.3** são analisadas a seguir.

AMOSTRAGEM

Em um circuito de fonte de alimentação, a tensão definida como **tensão de saída** é a tensão *cc* fornecida pela fonte, conforme ilustrado na **Fig.4**.

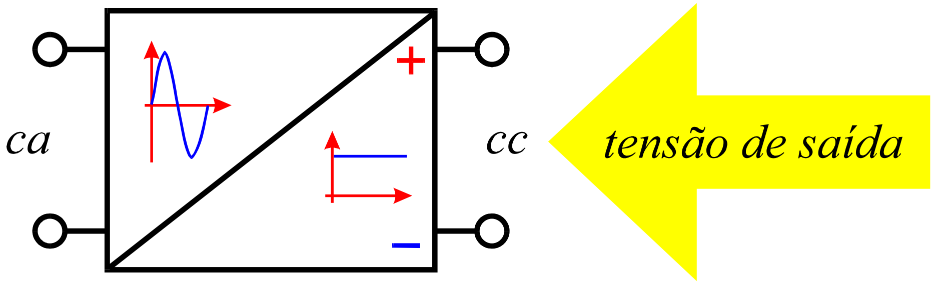


Fig.4 Definição da tensão de saída em uma fonte de alimentação *cc*.

Para obter informação do comportamento da tensão de saída é necessária a obtenção de uma **amostra** que represente, com fidelidade, possíveis variações que ocorram na saída. Nas fontes de alimentação utiliza-se um divisor de tensão para a obtenção da amostra, conforme ilustrado na **Fig.5**.

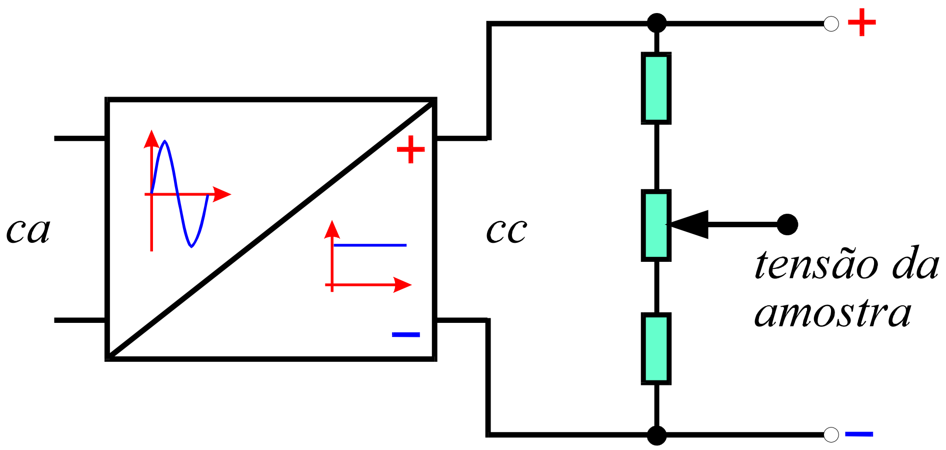


Fig.5 Divisor de tensão para obtenção de uma amostra da tensão de saída.

Como em muitas ocasiões é necessário ajustar o nível da tensão da amostra, os divisores de tensão usualmente dispõem de um potenciômetro ou *trimpot*, como se pode observar na **Fig.5**.

REFERÊNCIA

A **referência** consiste em uma tensão de valor constante, que independe das variações na corrente de carga ou no nível da tensão de entrada. Essa função pode ser obtida com o uso de um diodo Zener que fornece uma tensão fixa de referência. A **Fig.6** mostra duas configurações que possibilitam a obtenção da tensão de referência.

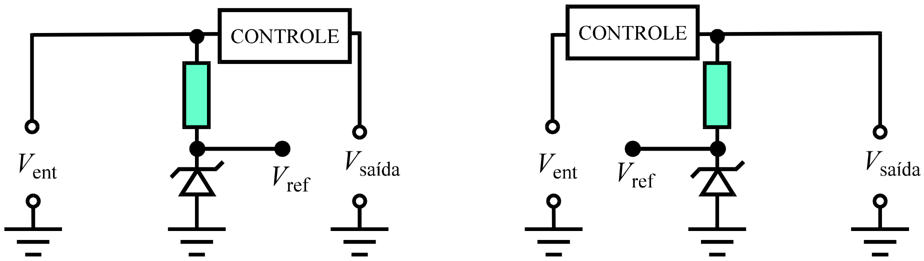


Fig.6 Dois arranjos possíveis para obtenção da tensão de referência.

COMPARAÇÃO

No circuito compondo a fonte de alimentação, o bloco do **circuito comparador** é configurado como mostrado na **Fig.7**.

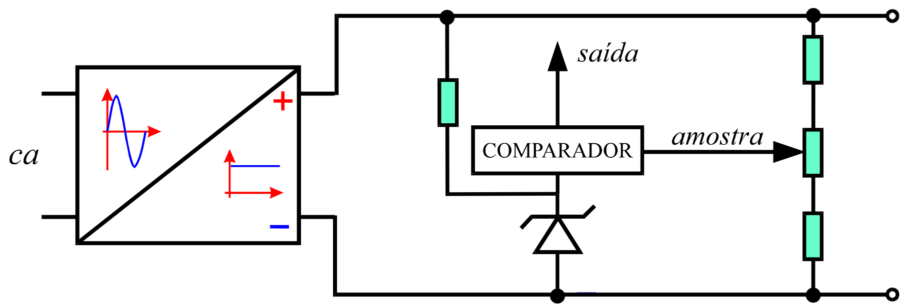


Fig.7 Configuração do circuito comparador na fonte de alimentação.

A função de comparação pode ser executada por apenas um transistor ou por circuitos mais elaborados. Quando apenas um transistor é empregado como comparador, a tensão de referência é aplicada ao emissor e a tensão da amostra é aplicada à base, como mostrado na **Fig.8**.

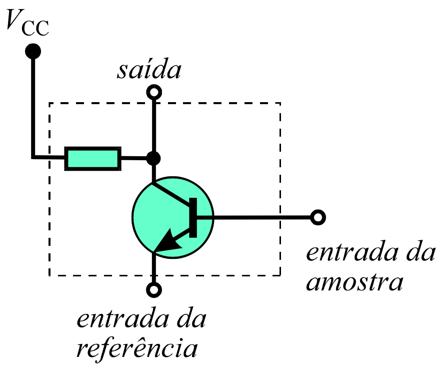


Fig.8 Circuito para a comparação entre amostra e referência.

Na configuração mostrada na **Fig.8**, a corrente drenada pelo coletor do transistor comparador depende da diferença entre as tensões da amostra e do emissor. Essa diferença corresponde à tensão V_{BE} do transistor.

CONTROLE

O elemento de **controle** da fonte de alimentação interpreta o sinal proveniente do comparador e efetua a correção de forma a manter a tensão de saída constante.

A **Fig.9** mostra os componentes do bloco de controle. O transistor de controle sofre variações na tensão V_{CE} entre coletor e emissor de forma a manter a tensão de saída sempre constante.

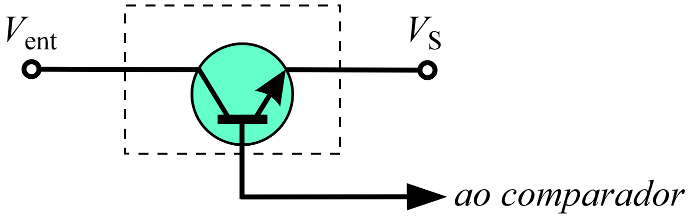


Fig.9 Porção de controle do circuito comparador.

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO CIRCUITO REGULADOR

O princípio de funcionamento do circuito regulador pode ser analisado sob dois aspectos distintos:

- Funcionamento com variação na tensão de entrada.
- Funcionamento com variação na corrente de carga.

VARIAÇÃO NA TENSÃO DE ENTRADA

Os efeitos decorrentes de variações na tensão de entrada podem ser analisados tomando-se como condição inicial os parâmetros elétricos definidos na **Fig.10**.

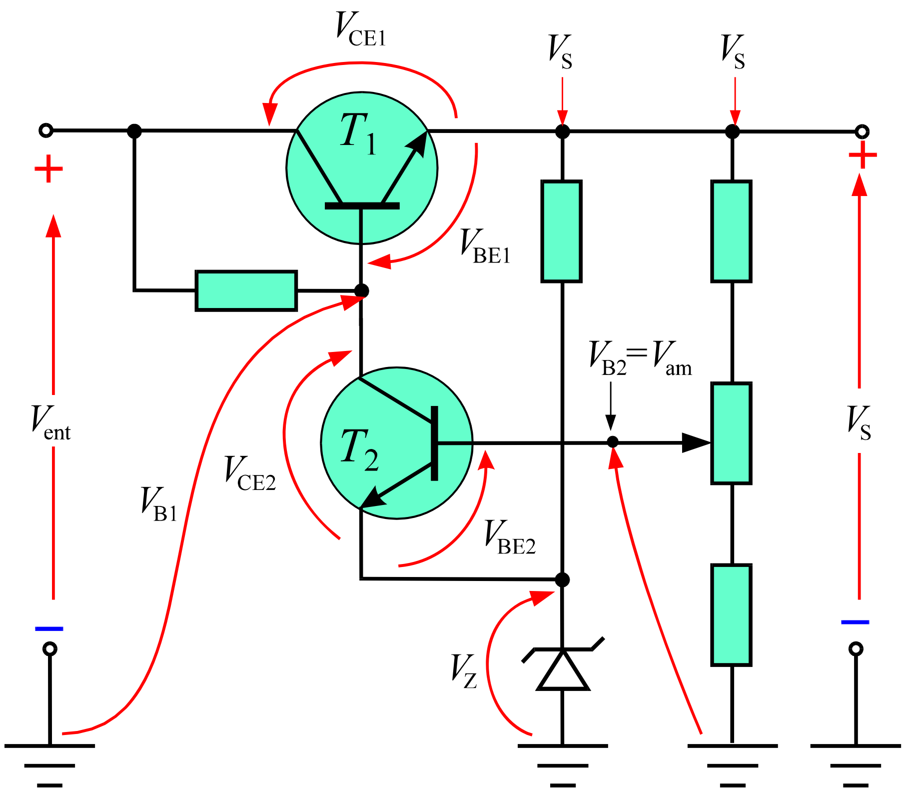


Fig.10 Bloco regulador da fonte *cc* e parâmetros elétricos correspondentes.

Quando ocorre um aumento na tensão de entrada V_{ent}, a tensão V_{B1}, na base do transistor T_1, tende a se elevar momentaneamente, fazendo que a tensão de saída V_S também aumente, como indicado na **Fig.11**.

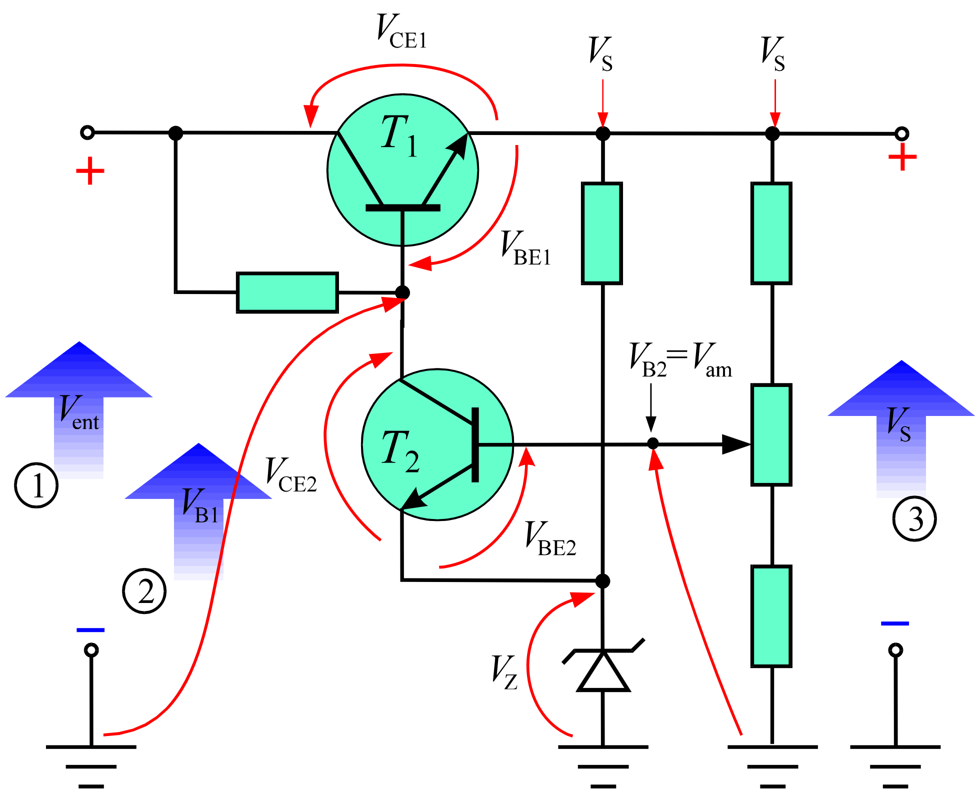


Fig.11 Efeito produzido por um aumento momentâneo na tensão de entrada.

Entretanto, a elevação na tensão de saída faz que a tensão V_{B2}, fornecida à base de T_2 pelo circuito de amostragem se eleve, resultando em uma elevação da tensão V_{BE2} do transistor T_2, como mostrado na **Fig.12**.

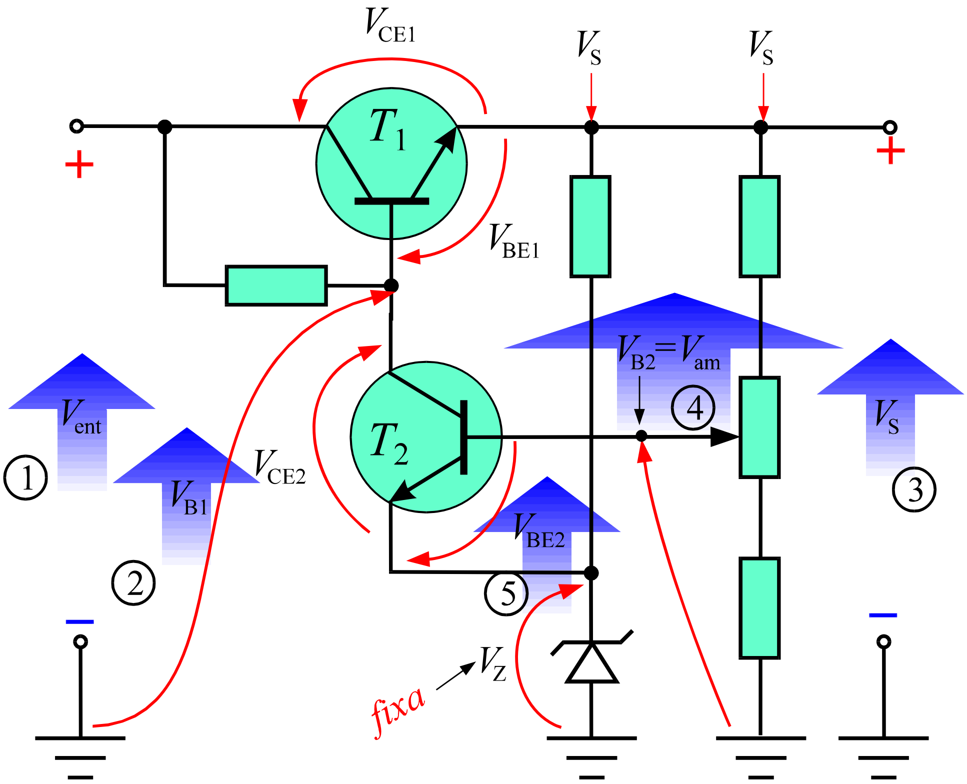


Fig.12 Aumento produzido na base do transistor T_2 devido ao aumento na tensão de saída.

O valor mais elevado da tensão V_{BE2} provoca um aumento na corrente de base do transistor T_2 e conseqüentemente ocorre um aumento na corrente drenada pelo coletor daquele transistor. Essa seqüência de eventos está representada no diagrama a seguir:

$V_{B2}\uparrow$ ⇒ **$V_{BE2}\uparrow$** ⇒ **$I_{C2}\uparrow$**

Com o aumento na corrente I_{C2}, a tensão V_{CE2} que havia aumentado, agora diminui fazendo que a tensão na base do transistor T_1 retorne a um valor bem próximo do inicial, conforme indicado na **Fig.13**.

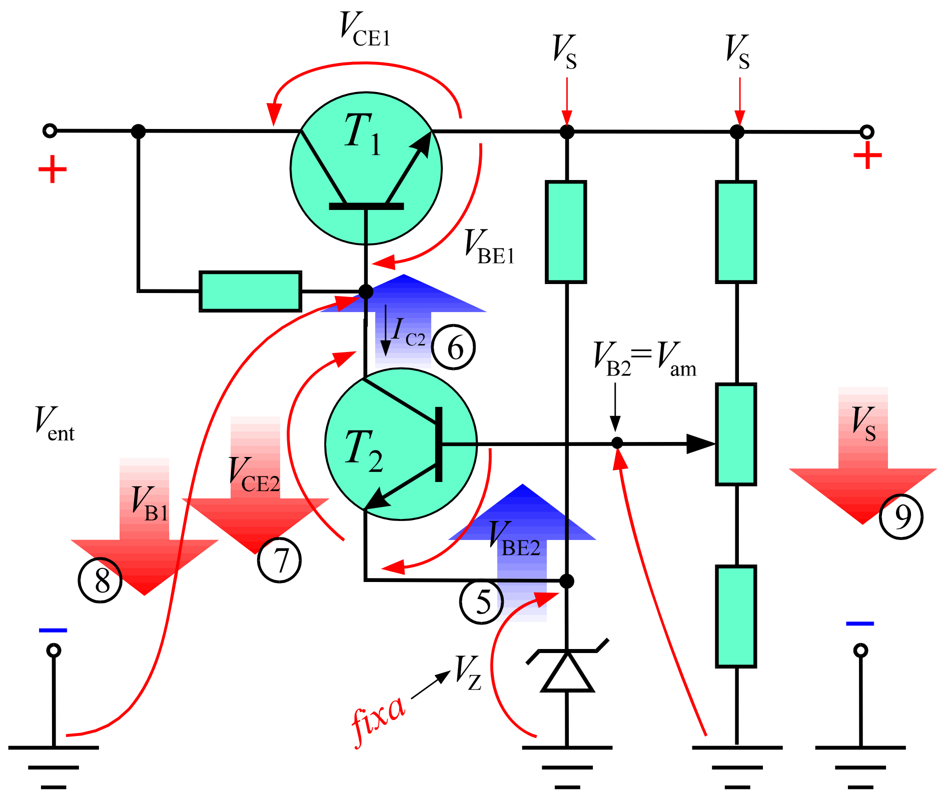


Fig.13 Efeito final produzido na tensão de saída após um aumento na tensão de entrada.

Todo o processo ocorrido após o aumento na tensão de entrada está sumarizado no diagrama de blocos mostrado na **Fig.14**.

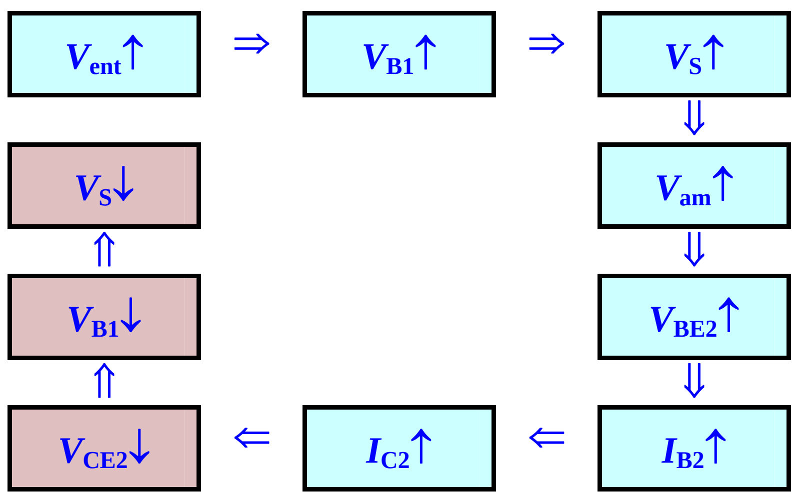


Fig.14 Diagrama de blocos representativo da seqüência de eventos decorrentes de um aumento na tensão de entrada do estágio regulador.

Se, por outro lado, a tensão de entrada diminui, o comportamento do circuito segue a seqüência de eventos mostrada na **Fig.15**.

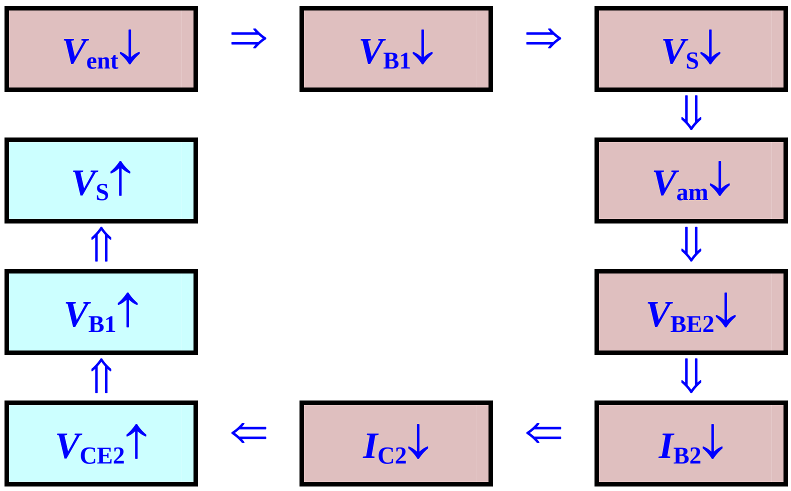


Fig.15 Diagrama de blocos representativo da seqüência de eventos decorrentes de uma diminuição na tensão de entrada do estágio regulador.

VARIAÇÃO NA CORRENTE DE CARGA

Os efeitos decorrentes de variações na corrente de carga podem ser analisados tomando-se como condição inicial os parâmetros elétricos definidos na **Fig.16**.

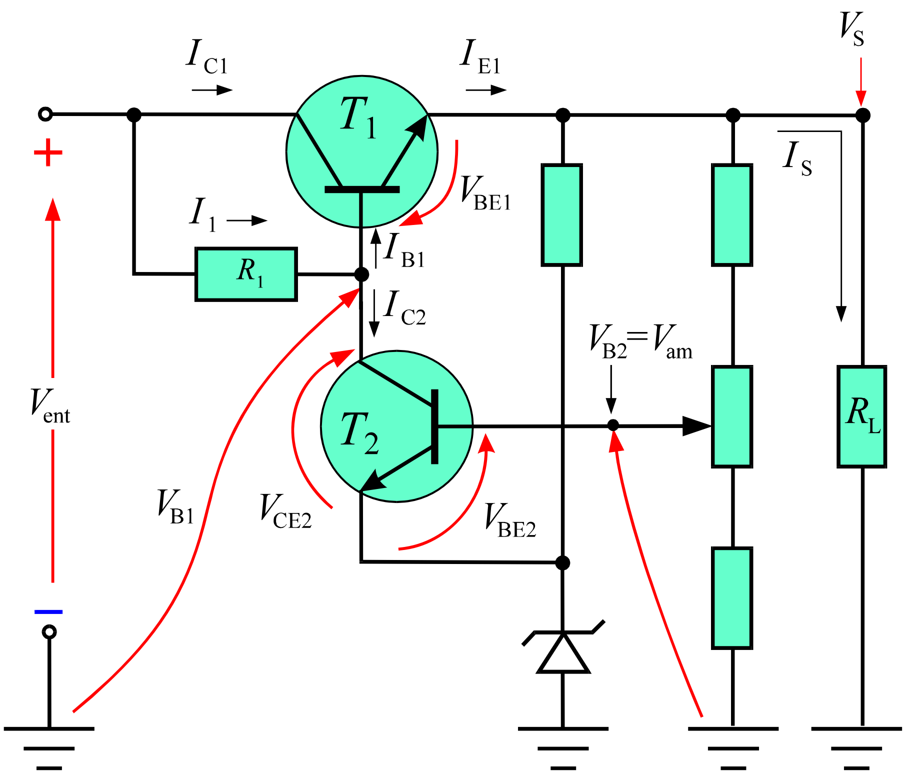


Fig.16 Bloco regulador da fonte *cc* e parâmetros elétricos correspondentes.

Na análise do comportamento do circuito, mostrado na **Fig.16**, perante variações na corrente de carga, vale observar o seguinte aspecto:

Qualquer acréscimo na corrente I_{C2} provoca um decréscimo na corrente I_{B1} e vice-versa.

Isso é conseqüência do fato de um aumento na corrente I_{C2} provocar uma diminuição na tensão V_{CE2} indicada na **Fig.16**. Isso reduz a tensão V_{B1}, e por conseguinte a tensão V_{BE1}. O efeito resultante é portanto uma redução na corrente I_{B1}.

A partir dessas considerações, o comportamento do circuito regulador pode ser analisado admitindo-se inicialmente uma diminuição no valor da resistência de carga. Isso produz uma diminuição momentânea na tensão V_S. Como $V_S = V_{B2}$, a tensão V_{BE2} tende a diminuir, devido ao valor fixo da tensão no diodo Zener, conforme ilustrado na **Fig.17**.

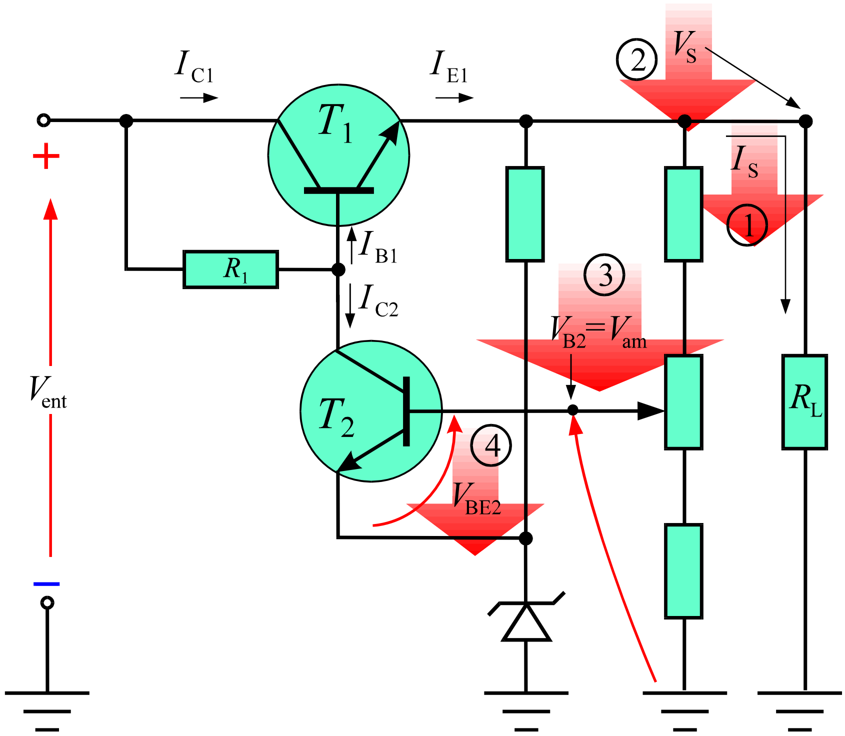


Fig.17 Efeito sobre o transistor T_2 produzido por uma diminuição na corrente de carga.

A diminuição na tensão V_{BE2} provoca um decréscimo na corrente I_{B2} fazendo que a corrente I_{C2}, indicada na **Fig.17**, também diminua. Como observado anteriormente, a diminuição em I_{C2} deve ser balanceada por um aumento na corrente I_{B1} , injetada na base do transistor T_1, como indicado na **Fig.18**.

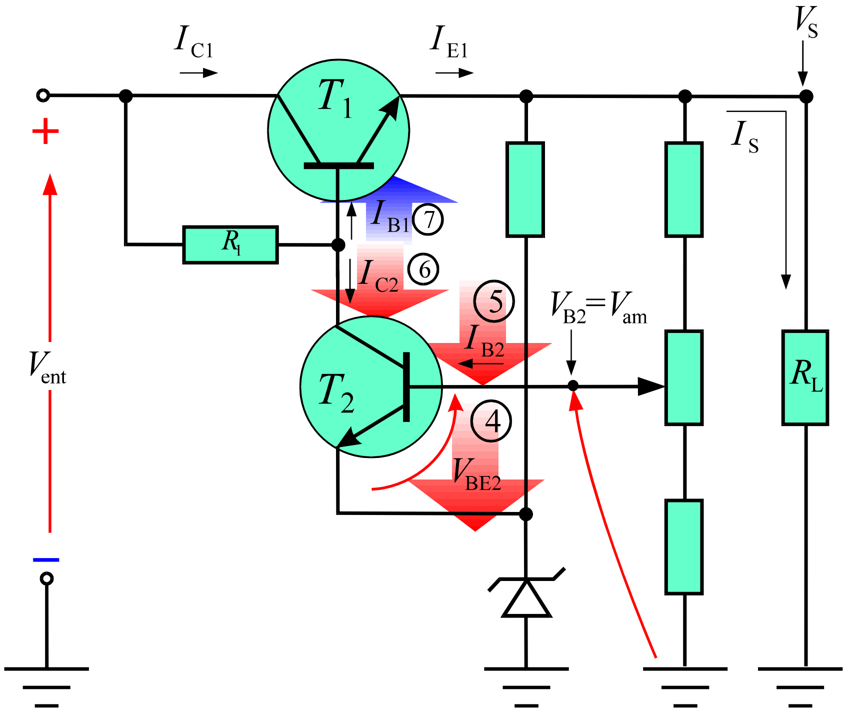


Fig.18 Efeito produzido sobre as correntes no circuito após a diminuição da corrente de carga.

Com o acréscimo da corrente I_{B1} aumenta também a corrente de coletor I_{C1} no transistor T_1. Esse aumento provoca por sua vez um aumento na corrente de carga, elevando portanto a tensão de saída de volta para seu valor nominal, como ilustrado na **Fig.19**.

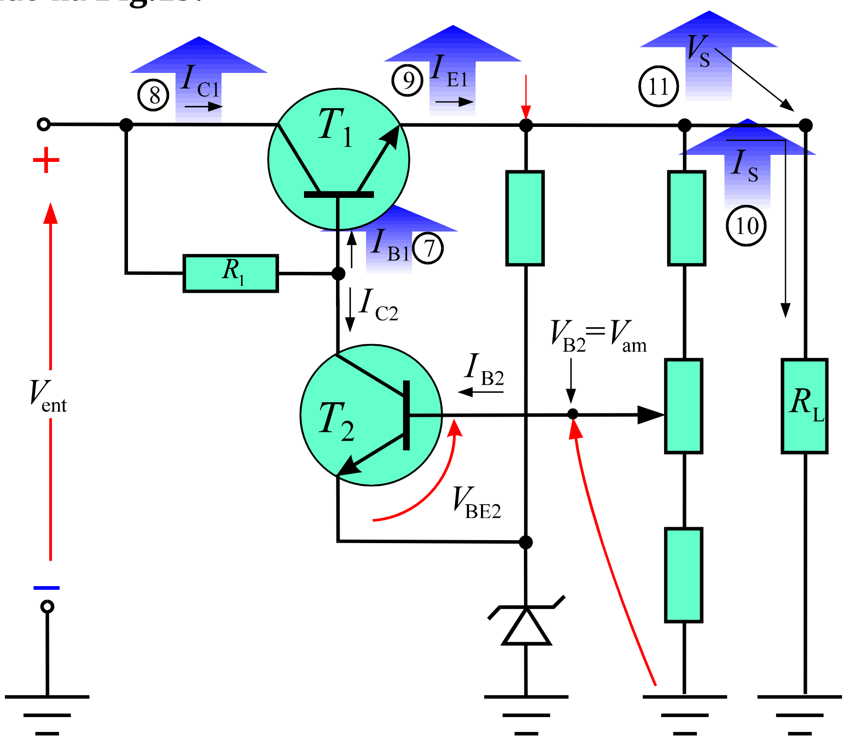


Fig.19 Efeito produzido de volta na saída após a atuação dos elementos do circuito regulador.

O diagrama mostrado na **Fig.20** resume o comportamento do circuito sob o efeito de uma diminuição inicial na corrente de carga.

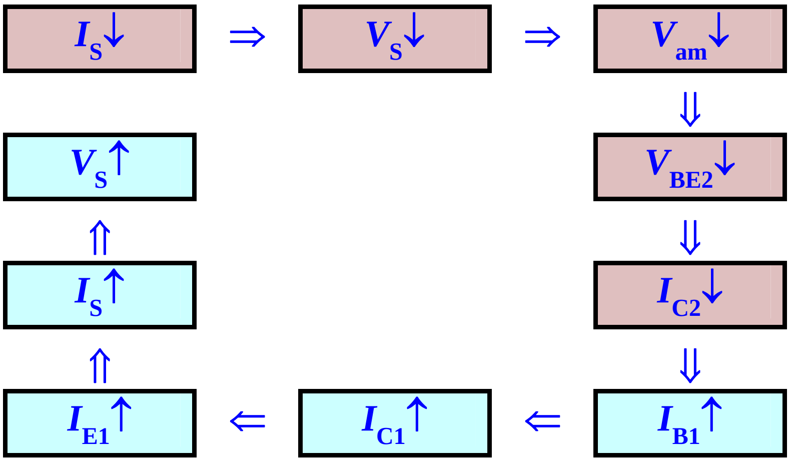


Fig.20 Sumário dos efeitos decorrentes de uma diminuição na corrente de carga no circuito regulador.

Quando a corrente de carga aumenta, a seqüência de alterações observadas no circuito regulador segue o esquema representado no diagrama de blocos da **Fig.21**.

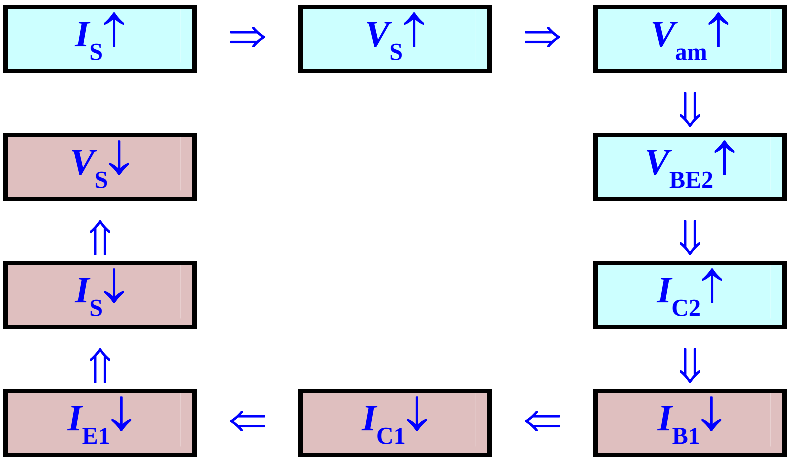


Fig.21 Sumário dos efeitos decorrentes de um aumento na corrente de carga no circuito regulador.

CIRCUITOS ADICIONAIS UTILIZADOS NAS FONTES REGULADAS

Além dos componentes utilizados nas "configurações mais simples" de fontes reguladas, podem-se acrescentar outros componentes ou mesmo circuitos para melhoria das características de funcionamento. Alguns exemplos são:

- Transistores em configuração Darlington.
- Circuito para limitação da corrente de curto-circuito.

CONFIGURAÇÃO DARLINGTON

A configuração **Darlington**, mostrada na **Fig.22**, é uma forma específica de ligação entre dois transistores. Essa forma de ligação tem características singulares.

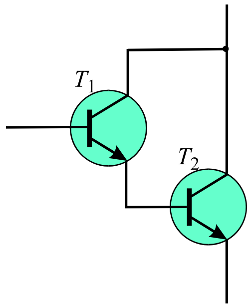


Fig.22 Configuração Darlington.

O princípio de funcionamento da configuração Darlingon pode ser compreendido a partir da análise do circuito simples mostrado na **Fig.23**. Como pode ser aí observado, o resistor R_B fornece uma corrente de base I_{B1} ao transistor T_1. Essa corrente é amplificada por T_1, gerando uma corrente de coletor

$$I_{C1} = \beta_1 I_{B1}$$

Admitindo-se a aproximação $I_{E1} \approx I_{C1}$ conclui-se que

$$I_{E1} \approx \beta_1 I_{B1} \qquad (1)$$

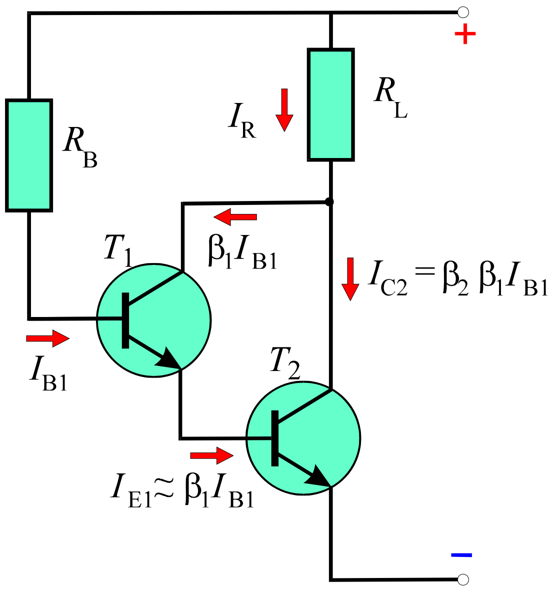


Fig.23 Correntes nos transistores da configuração Darlington.

Como mostrado na **Fig.23**, a corrente I_{E1} flui para a base de T_2, e portanto

$$I_{B2} = I_{E1} = \beta_1 I_{B1}$$

O transistor T_2 amplifica a corrente de base, gerando uma corrente de coletor

$$I_{C2} \approx \beta_2 I_{B2} = \beta_2 \beta_1 I_{B1}$$

Como a corrente de carga I_R, mostrada na **Fig.23** é a soma $I_R = I_{C2} + I_{C1}$, obtém-se

$$I_R = \beta_2 \beta_1 I_{B1} + \beta_1 I_{B1}$$

ou equivalentemente

$$I_R = \beta_1(\beta_2 + 1)I_{B1} \tag{2}$$

Admitindo conhecida a corrente de carga, a corrente na base do transistor T_1 pode ser obtida diretamente da **Eq.(2)**, resultando em

$$I_{B1} = \frac{I_R}{\beta_1(\beta_2 + 1)} \tag{3}$$

A **Eq.(3)** mostra que, devido aos valores tipicamente altos para os ganhos dos dois transistores, uma carga exigindo um alto valor de corrente pode ser controlada através de uma corrente na base do transistor T_1, que pode chegar a ser centenas ou até milhares de vezes inferior.

Por exemplo, comparando-se as duas situações mostradas na **Fig.24**, para se obter uma corrente de carga de 2 A, com apenas um transistor de ganho β=50, a corrente de base necessária vale

$$I_{B1} = \frac{I_R}{\beta_1} = \frac{2}{50} = 40\ \text{mA}$$

Por outro lado, para a configuração Darlington da **Fig.24b**, com dois transistores de ganhos $\beta_1=\beta_2=50$ obtém-se

$$I_{B1} = \frac{I_R}{\beta_1(\beta_2 + 1)} = \frac{2}{50 \times 51} \approx \frac{2}{50 \times 50} = 800\ \mu\text{A}$$

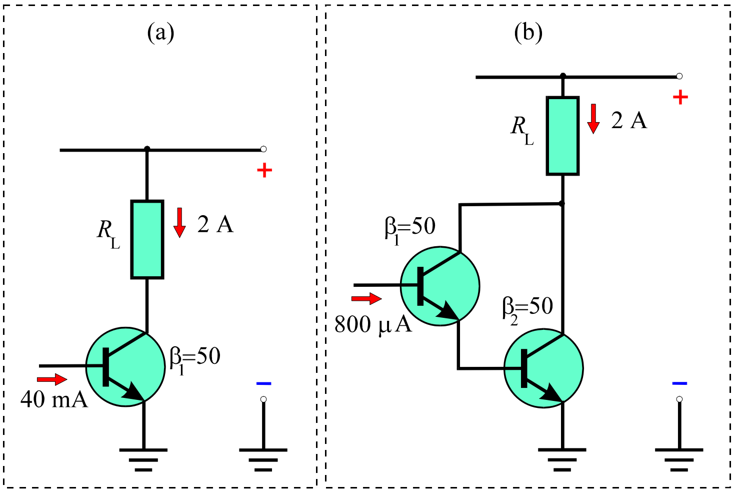


Fig.24 **(a)** Amplificador de corrente com apenas um transistor.
(b) Amplificador na configuração Darlington.

Esse resultado mostra que a configuração Darlington permite a utilização de uma corrente de base muito menor do que aquela obtida com o uso de apenas um transistor.

A **Fig.25** mostra o diagrama de uma fonte regulada simples que utiliza transistores ligados na configuração Darlington.

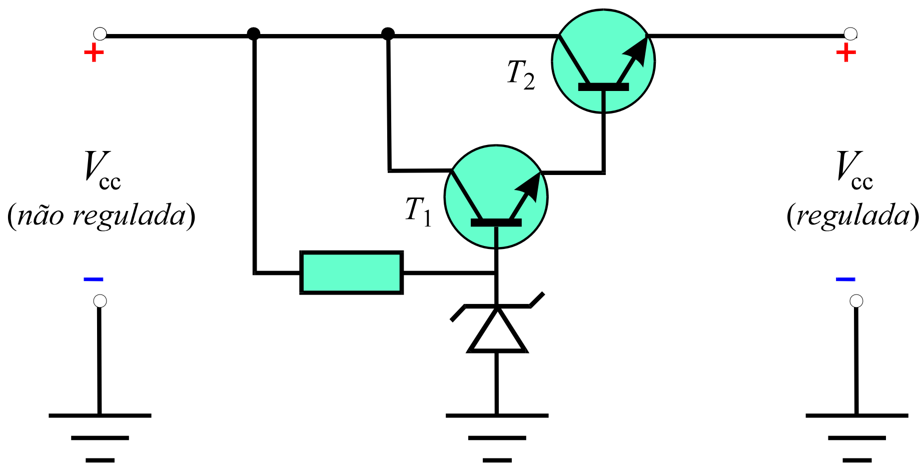


Fig.25 Circuito regulador de uma fonte de alimentação que utiliza a configuração Darlington.

Como vantagens fundamentais de utilização da configuração Darlington no circuito regulador, pode-se destacar:

- As variações de corrente no diodo Zener em função da corrente de carga são menores, aumentando assim a estabilidade da tensão de saída.

- Uma menor dissipação de potência é obtida no diodo Zener.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Descreva a função de cada um dos blocos que compõem uma fonte regulada com comparador.

2. Descreva a seqüência de eventos decorrentes de uma diminuição na tensão de entrada no circuito da **Fig.10**.

3. Descreva a seqüência de eventos decorrentes de um aumento na corrente de carga para o circuito da **Fig.16**.

4. Quais as vantagens de utilização da configuração Darlington em um circuito regulador?

BIBLIOGRAFIA

CIPELLI, Antônio Marco Vicari & SANDRINI, Valdir João. Teoria do desenvolvimento de Projetos de Circuitos Eletrônicos . 7.ed. São Paulo, Érica, 1983. 580p.

FIGINI, Gianfranco. Eletrônica industrial; circuitos e aplicações. São Paulo, Hemus, c 1982. 336p.

MILLMAN, Jacob & HALKIAS, Chistos C. Eletrônica: dispositivos e circuitos.
Trad. Elédio Robalinho e Paulo Elyot Meirelles Villela.. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1981. il. v.2

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Introdução

A partir deste fascículo inicia-se uma fase importante no estudo da Eletrônica, com a introdução dos circuitos amplificadores. A importância desse estudo se deve a ampla utilização de estágios amplificadores na quase totalidade de equipamentos eletrônicos em uso hoje em dia, tais como aqueles utilizados em sistemas de áudio e de vídeo, em sistemas de comunicação etc.

Os tópicos introduzidos neste fascículo fornecem uma perspectiva mais detalhada de como os elementos de circuito devem ser combinados com o transistor para a construção de amplificadores simples. Esses tópicos incluem uma breve introdução às características de sinais elétricos. Em seguida são descritas as características básicas de estágios amplificadores e a forma de implementação desses dispositivos com o emprego do transistor. São também analisadas as técnicas comumente empregadas para a realização do acoplamento entre estágios amplificadores distintos. Os parâmetros utilizados para caracterizar o desempenho de um estágio amplificador são descritos no final do fascículo.

Para a boa compreensão do conteúdo e desenvolvimento das atividades contidas neste fascículo, o leitor deverá estar familiarizado com os conceitos relativos a:

- Transistor bipolar: ponto de operação.

Amplificação de sinais elétricos

Denomina-se **sinal elétrico** qualquer variação de tensão ou corrente através da qual seja possível transferir informação. Uma representação gráfica de um sinal elétrico arbitrário está mostrada na **Fig.1**.

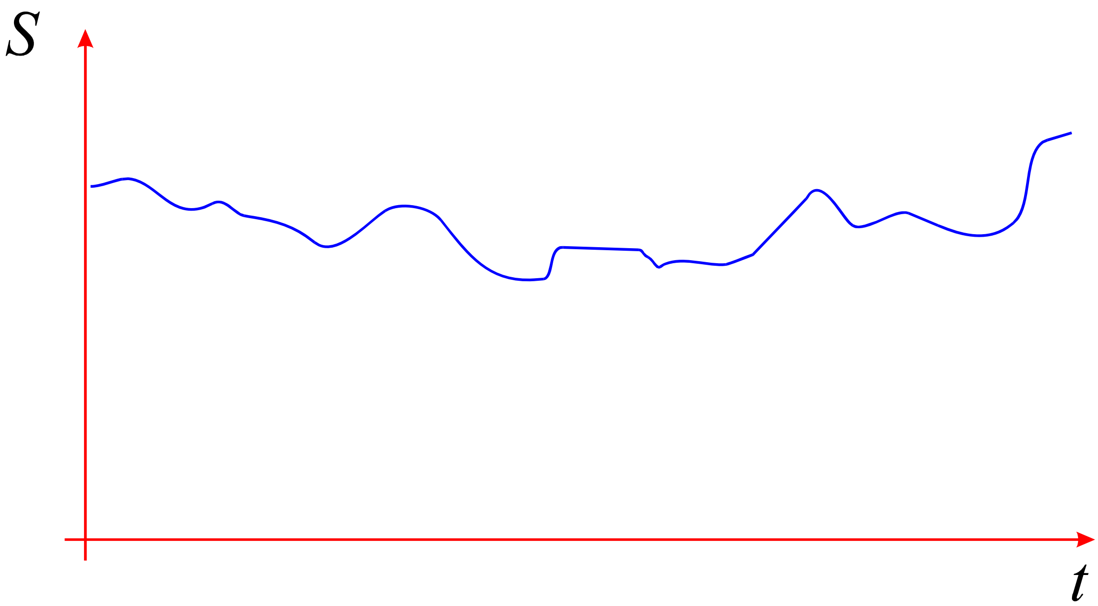
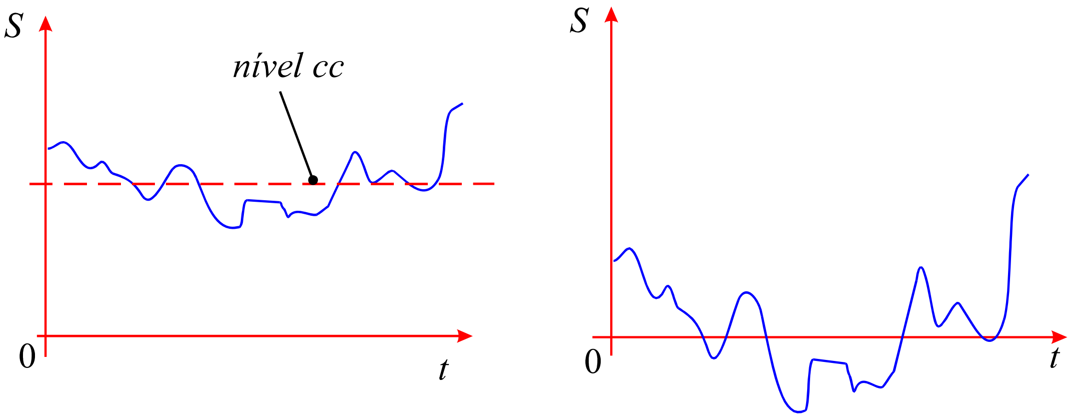


Fig.1 Representação gráfica de um sinal elétrico.

Os sinais elétricos podem apresentar-se como variações de tensão ou de corrente medidas com respeito a uma referência nula ou não dessas grandezas, conforme ilustrado na **Fig.2**.

O sinal de televisão, por exemplo, constitui-se de variações de tensão que fornecem uma "versão elétrica" das imagens captadas pela câmara. A música, reproduzida por um alto falante corresponde a um sinal elétrico transformado em som pelo alto-falante.



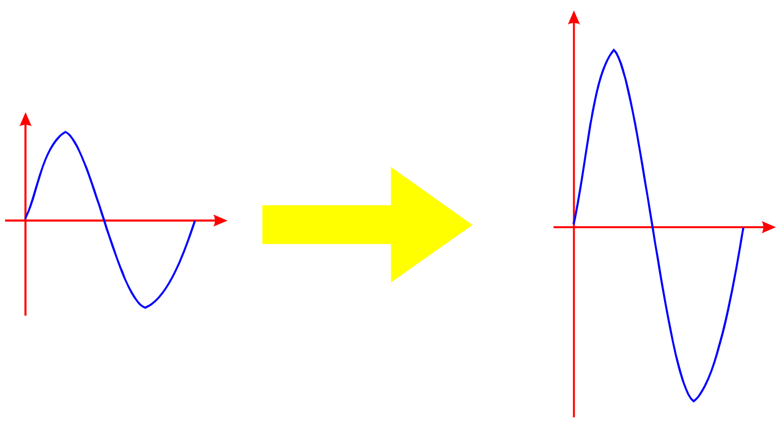
(a) (b)

Fig.2 (a) Variação absoluta de um sinal elétrico.**(b)** Variação relativa de um sinal elétrico.

Sinais elétricos são variações de tensão ou corrente que transportam informação.

Dependendo da aplicação a que se destinam, os sinais elétricos podem ser de grande ou pequena intensidade. Por exemplo, para movimentar os alto-falantes de um estádio de futebol necessita-se que o sinal elétrico a ser reproduzido tenha uma grande intensidade, enquanto que um sinal de pequena intensidade é suficiente para movimentar os fones de ouvido de um rádio ou gravador.

Para possibilitar a transformação de um sinal de pequena intensidade em outro de maior intensidade, faz-se uso de um processo denominado de **amplificação** que permite manter a freqüência e a forma do sinal original inalteradas, conforme ilustrado na **Fig.3**.



sinal original *sinal amplificado*

Fig.3 Efeito da amplificação em um sinal elétrico.

AMPLIFICADOR E ESTÁGIO AMPLIFICADOR

O termo **amplificador** refere-se a todo um conjunto de componentes e circuitos que realizam a amplificação de um sinal. O amplificador é geralmente representado em diagramas de circuito pelo bloco triangular mostrado na **Fig.4**.

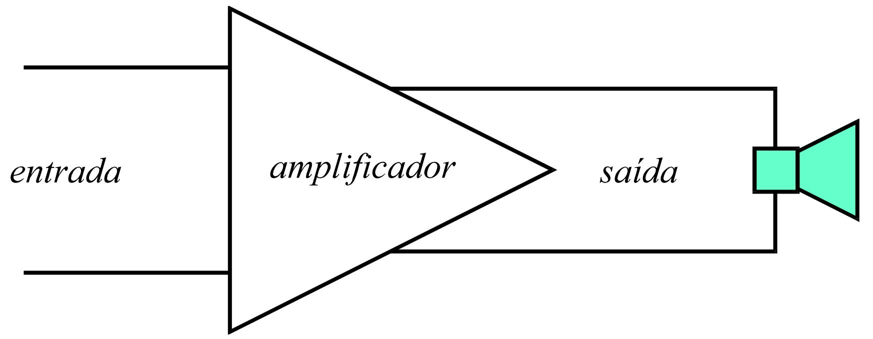


Fig.4 Representação simplificada de um amplificador.

O amplificador de um toca-discos, por exemplo, é composto de uma série de pequenos circuitos que, no conjunto, amplificam por mais de 1.000 vezes o sinal de entrada, gerado pelos movimentos verticais da agulha, de forma a permitir o funcionamento adequado do alto-falante.

Fatores de amplificação da ordem de 1.000 a 2.000 são empregados constantemente em circuitos de rádio, televisão e em equipamentos de controle industrial. Entretanto, devido a limitações de ordem prática, não é sempre possível atingir aqueles altos fatores com o uso de apenas um amplificador. Para contornar esse tipo de limitação, a amplificação é feita parceladamente, através de uma série de circuitos, ou **estágios amplificadores**, que realizam amplificações sucessivas do sinal, conforme ilustrado na **Fig.5**.

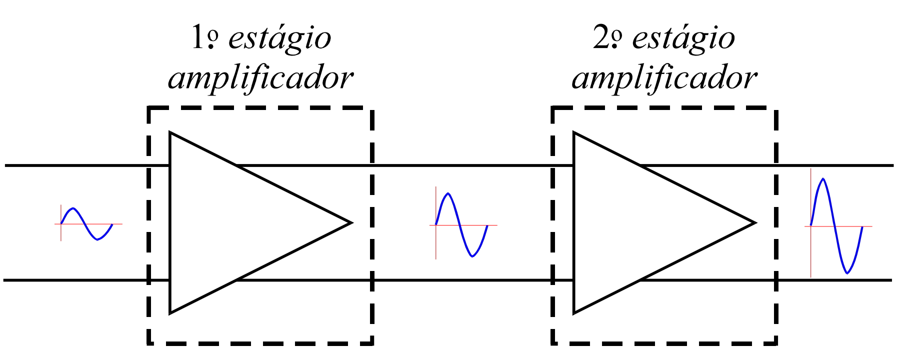


Fig.5 Estágios amplificadores utilizados para aumentar o fator de amplificação.

GANHO DE UM ESTÁGIO AMPLIFICADOR

O fator de amplificação de um estágio amplificador é denominado de **ganho**. Este parâmetro define portanto quantas vezes o sinal é amplificado pelo estágio.

Admitindo que o sinal de entrada de um estágio amplificador seja senoidal, conforme ilustrado na **Fig.6**, pode-se calcular o **ganho de amplitude** pela expressão

$$G = \frac{S_{pp2}}{S_{pp1}} \tag{1}$$

onde:

- S_{pp2} = amplitude do sinal de saída, medida de pico a pico.
- S_{pp1} = amplitude do sinal de entrada, medida de pico a pico.

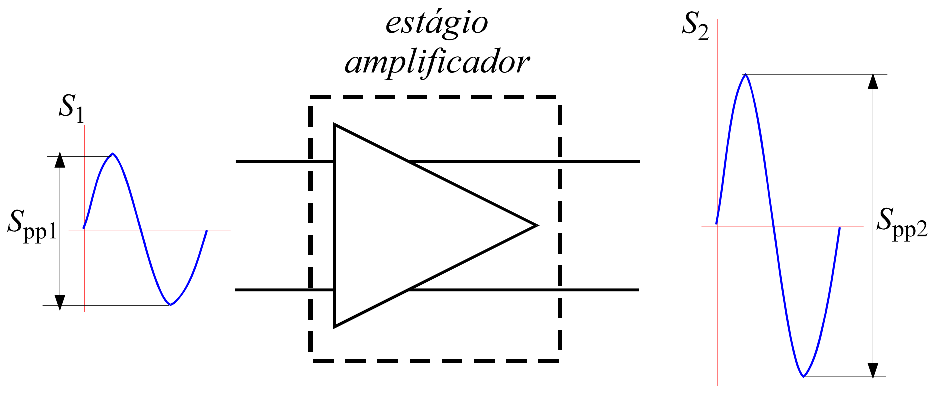


Fig.6 Parâmetros utilizados na definição do ganho de amplitude de um estágio amplificador.

Na **Eq.(1)** a amplitude do sinal pode ser a tensão ou corrente a ele associada. Pode-se também definir um ganho de potência para um estágio amplificador como a relação entre a potência de saída e a potência de entrada, como descrito a seguir.

TIPOS DE ESTÁGIOS AMPLIFICADORES

Os estágios amplificadores podem ser de três tipos:

- Estágio amplificador de tensão.
- Estágio amplificador de corrente.
- Estágio amplificador de potência.

Estágio amplificador de tensão

Esse tipo de estágio é utilizado para aumentar a amplitude de tensão do sinal de entrada que se situa tipicamente na faixa de microvolts a milivolts, propiciando um ganho típico da ordem de 100.

Os estágios amplificadores de tensão funcionam com correntes pequenas não podendo ser utilizados para acionar, por exemplo, um alto-falante que necessita de correntes elevadas.

Estágio amplificador de corrente

Como o nome sugere, esse tipo de estágio amplificador destina-se a fornecer grandes variações de corrente de saída a partir de pequenas variações na corrente de entrada do estágio.

Estágio amplificador de potência

Esse tipo de estágio tem um pequeno ganho de tensão, usualmente inferior a 10, podendo propiciar simultaneamente um ganho de corrente. Destina-se ao acionamento de cargas, como por exemplo, alto-falantes, relés etc.

Como descrito anteriormente, o ganho dos estágios de potência é normalmente definido pela relação

$$G_{\mathrm{P}} = \frac{P_{\mathrm{saída}}}{P_{\mathrm{ent}}} \qquad (2)$$

onde:

- $P_{\mathrm{saída}}$= potência de saída.
- P_{ent} = potência de entrada.

Um estágio amplificador de potência pode liberar para a carga uma potência de alguns Watts para uma potência de entrada de alguns miliwatts.

AMPLIFICADOR DE SOM

O amplificador de som é composto de alguns estágios amplificadores de tensão e de um estágio amplificador de potência na saída, como ilustrado na **Fig.7**.

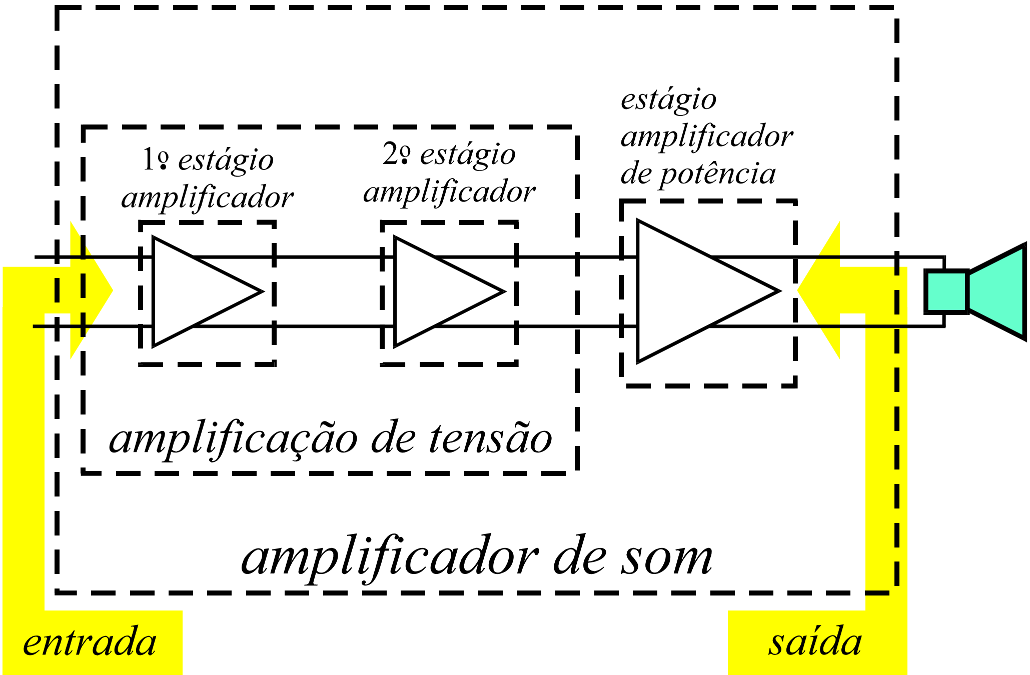


Fig.7 Diagrama representativo de um amplificador de som.

No diagrama mostrado na **Fig.7** os estágios amplificadores de tensão têm por finalidade amplificar o sinal de entrada até que a amplitude da tensão seja suficiente para maximizar o rendimento do amplificador de potência. Quando utilizados com esse fim, os estágios amplificadores de tensão são também denominados de **pré-amplificadores**.

O estágio amplificador de potência, após receber o sinal pré-amplificado, libera a potência necessária para acionar os alto-falantes do sistema de som.

ESTÁGIO AMPLIFICADOR A TRANSISTOR NA CONFIGURAÇÃO EMISSOR COMUM

O estágio amplificador que utiliza um transistor na configuração emissor comum, ilustrada na **Fig.8**, proporciona um alto ganho de tensão e de corrente. Isso permite que essa configuração seja largamente empregada na construção de amplificadores de potência.

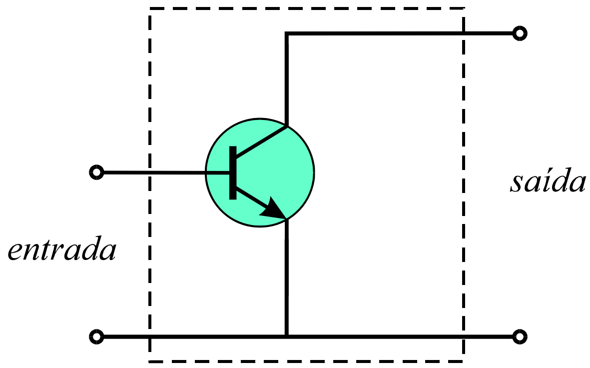


Fig.8 Estágio amplificador com transistor na configuração emissor comum.

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O princípio de funcionamento do estágio amplificador na configuração emissor comum pode ser analisado com base na **Fig.9**.

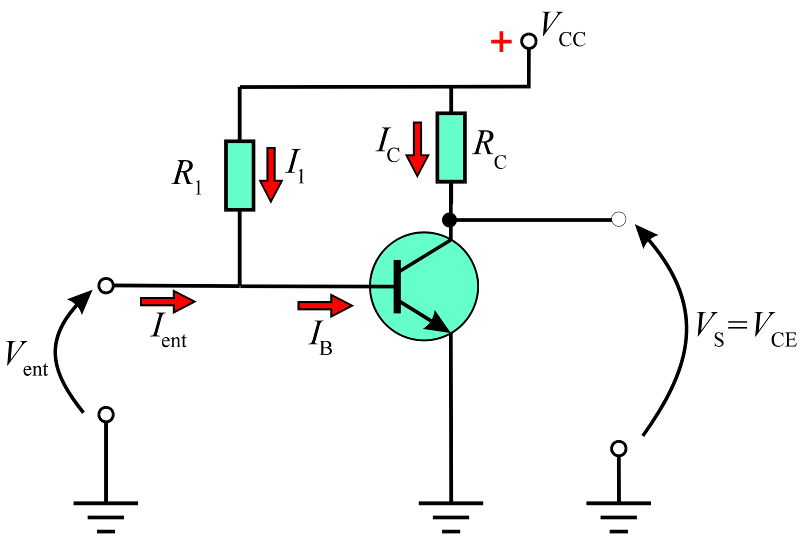


Fig.9 Circuito de um estágio amplificador na configuração emissor comum.

De acordo com a **Fig.9**, a corrente de base pode ser obtida da expressão

$$I_B = I_1 + I_{ent} \qquad (3)$$

onde I_{ent} é a corrente associada ao sinal de entrada e I_1 é a corrente no resistor R_1 da **Fig.9**.

Com a entrada em aberto, ou seja, com $I_{ent} = 0$, o transistor opera no ponto quiescente Q mostrado na **Fig.10**. Os parâmetros quiescentes, obtidos da **Fig.10**, são:

- Corrente de base $I_{BQ} = I_1$.
- Tensão coletor-emissor V_{CEQ}.
- Corrente de coletor I_{CQ}.

Para uma variação senoidal da corrente de entrada, a corrente de base pode ser obtida pela soma dada pela **Eq.(3)**. Essa soma está indicada graficamente na **Fig.11**. Como pode ser aí observado, a corrente de base varia senoidalmente em torno do valor quiescente $I_{BQ}=I_1$.

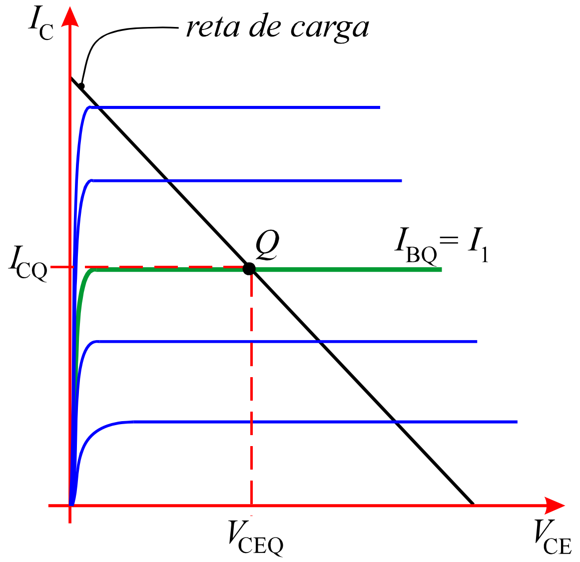


Fig.10 Ponto quiescente para o circuito da **Fig.9** na ausência de um sinal de entrada.

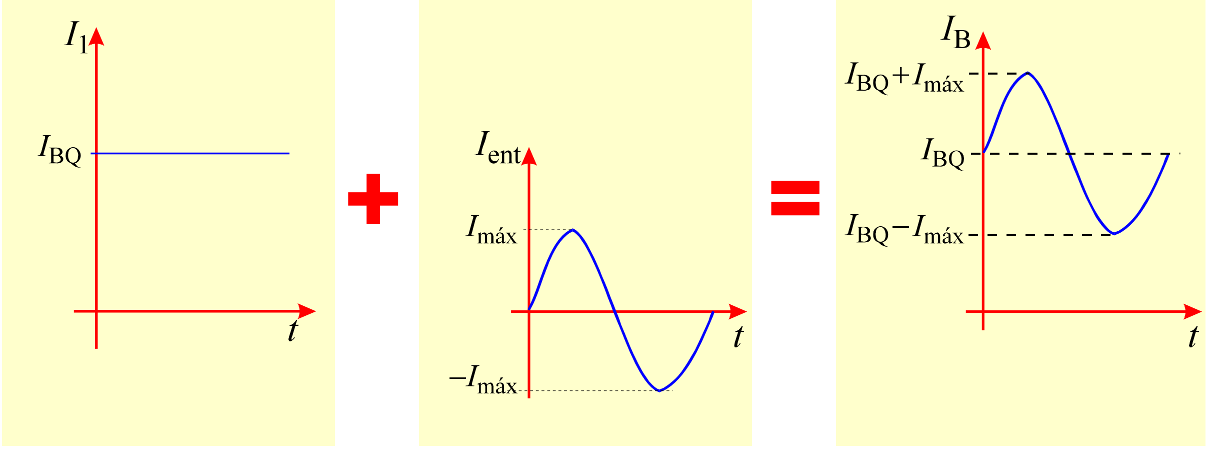


Fig.11 Componentes da corrente de base para uma corrente de entrada senoidal.

No semiciclo em que a corrente de entrada é positiva, a corrente de base excede o valor quiescente I_1. Isso faz que o ponto de operação se mova sobre a reta de carga, conforme indicado na **Fig.12**, ou seja, com a corrente de coletor aumentando e a tensão coletor-emissor diminuindo. Esse aumento na corrente de coletor prossegue até o instante de tempo em que a corrente de entrada atinge seu valor máximo $I_{máx}$.

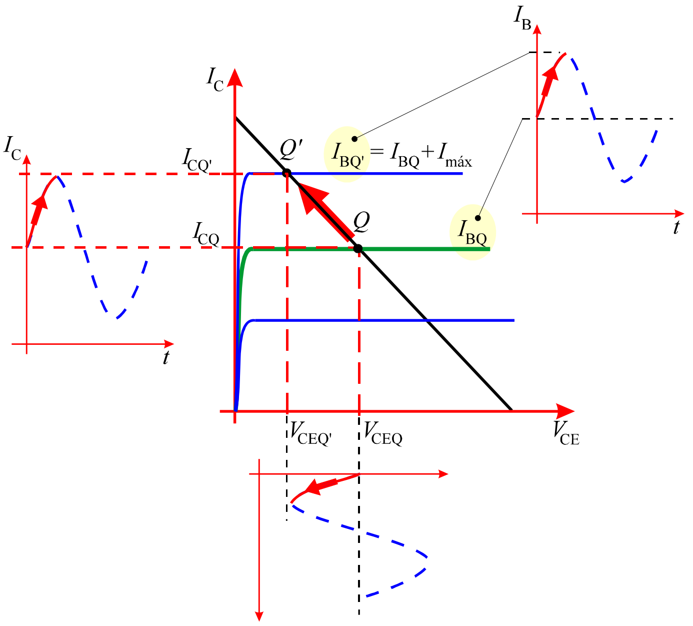


Fig.12 Alteração no ponto de operação durante o aumento da corrente de entrada no semiciclo positivo.

Esse instante de tempo define um novo ponto quiescente *Q'*, indicado na **Fig.12**. De acordo com a **Eq.(3)**, nesse novo ponto de operação a corrente de base assume o valor máximo

$$I_{BQ'} = I_1 + I_{máx} = I_{BQ} + I_{máx}$$

correspondente a uma corrente de coletor máxima $I_{CQ'}$ e uma tensão coletor-emissor mínima $V_{CEQ'}$.

Quando a corrente de entrada retorna ao valor nulo o ponto de operação do circuito retorna a sua posição inicial *Q*. A partir desse momento a corrente de entrada passa a se tornar negativa, fazendo que o ponto de operação se mova como indicado na **Fig.13**, ou seja, com a corrente de coletor diminuindo e a tensão coletor-emissor aumentando.

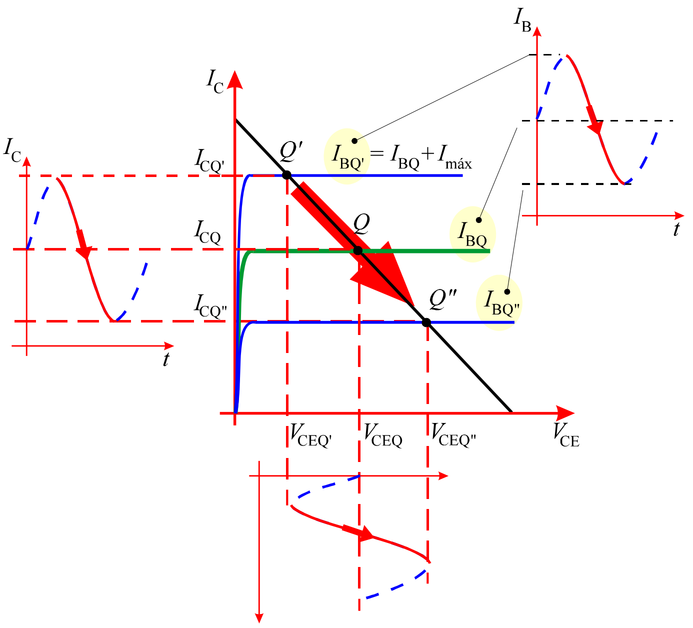


Fig.13 Alteração no ponto de operação durante o período de decréscimo da corrente de entrada.

No instante de tempo em que a corrente de entrada atinge o seu valor mínimo ($-I_{máx}$), o ponto de operação do circuito fica localizado em *Q*”, como indicado na **Fig.13**. Nessa condição, a corrente de base assume o valor mínimo

$$I_{BQ''} = I_{BQ} - I_{máx}$$

No novo ponto quiescente, a corrente de coletor assume seu valor mínimo $I_{CQ''}$ e a tensão coletor-emissor, o seu valor máximo $V_{CEQ''}$.

A partir do ponto *Q*'' a corrente de entrada torna a aumentar e o ponto de operação do circuito retorna a condição inicial definida pelo ponto de operação *Q*, conforme mostrado na **Fig.14**, completando o ciclo.

A partir dessa análise conclui-se que as correntes de base e de coletor, bem como a tensão coletor-emissor assumem uma forma senoidal, como mostrado na **Fig.15**.

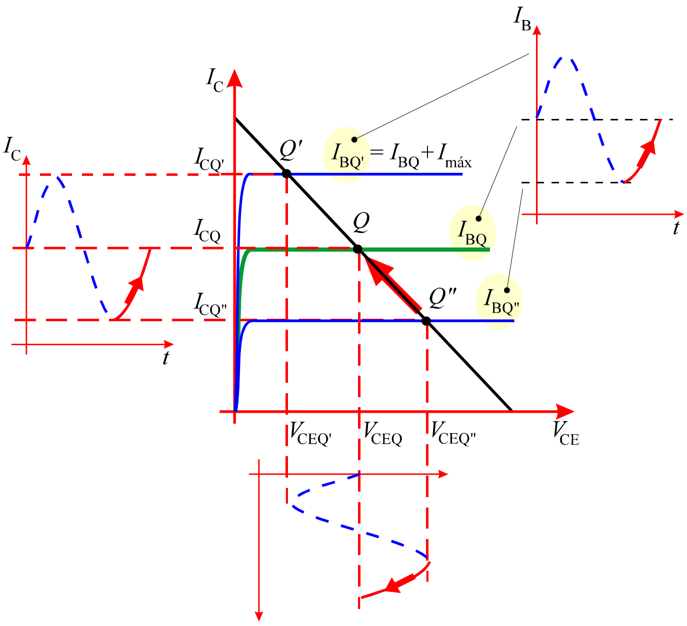


Fig.14 Alteração no ponto de operação durante o aumento da corrente de entrada, no semiciclo negativo.

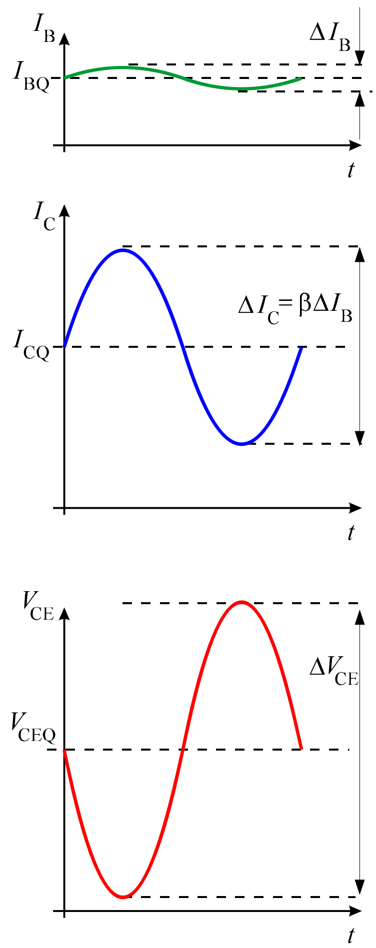


Fig.15 Variação no tempo das grandezas do circuito mostrado na **Fig.9**.

Como se pode observar na **Fig.15**, as grandezas do circuito da **Fig.9** exibem as seguintes características:

- A corrente de coletor é amplificada por um fator β, correspondente ao ganho de corrente do transistor em relação à corrente de entrada.
- A tensão de coletor, ou equivalentemente, a tensão de saída, é também uma versão amplificada da tensão de entrada. Existe no entanto um deslocamento no tempo de um semiciclo entre aquelas duas grandezas.

ACOPLAMENTO DE SINAIS

Um sinal elétrico existente em um circuito eletrônico pode ter um valor médio não nulo, ou seja, contendo uma componente ou nível *cc*, conforme ilustrado na **Fig.16**.

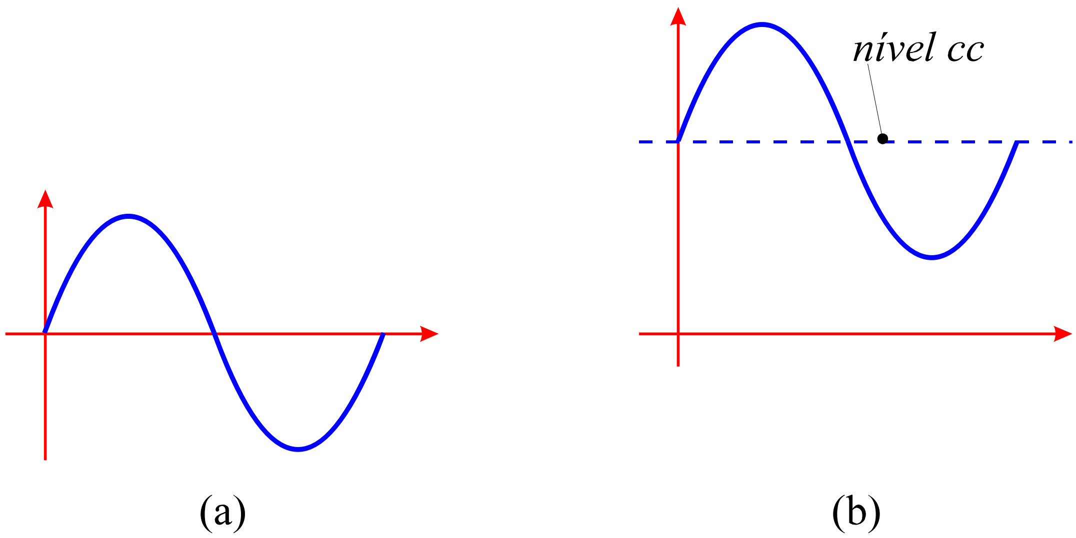


Fig.16 **(a)** Sinal com média temporal nula. **(b)** Sinal com média temporal não nula.

Como a informação transportada pelo sinal é relacionada apenas às suas variações no tempo, não é de interesse que a componente *cc* nele presente seja transferida entre os diversos estágios que compõem um circuito eletrônico, pois aquela componente, além de não conter nenhuma informação, pode alterar significativamente o ponto de operação do circuito na ausência do sinal.

Como ilustrado na **Fig.17**, o emprego de um capacitor ou de um transformador interconectando estágios sucessivos de um circuito eletrônico,

bloqueia a componente *cc*, permitindo apenas a passagem da porção variável do sinal.

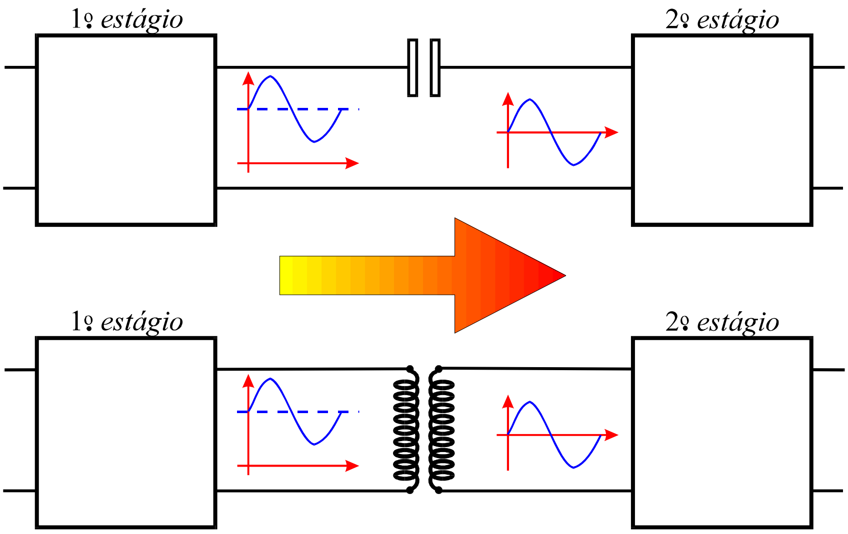


Fig.17 Técnicas de bloqueio da componente *cc* do sinal entre estágios de um circuito eletrônico.

O princípio ilustrado na **Fig.17** é utilizado freqüentemente em estágios amplificadores. Esses estágios estão sempre acompanhados na entrada e na saída de um capacitor ou de um transformador.

A **Fig.18** mostra um amplificador transistorizado com capacitores série de entrada e saída. Como pode ser aí observado, o circuito amplificador propriamente dito recebe apenas a parte variável do sinal. A fonte *cc*, utilizada para polarizar o transistor, introduz uma componente *cc* no sinal amplificado que também é bloqueada pelo capacitor de saída.

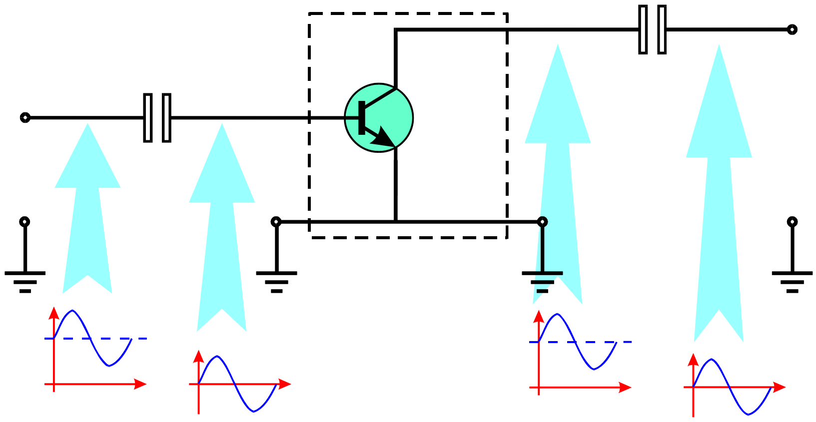


Fig.18 Arranjo série de um amplificador com dois capacitores para eliminação das componentes *cc* presentes nos sinais de entrada e de saída.

Nos estágios amplificadores transistorizados para operação em freqüências de áudio (20 Hz a 20 kHz), os capacitores de entrada e saída são, geralmente, eletrolíticos.

Em resumo, o circuito amplificador a transistor na configuração emissor comum é composto, fundamentalmente, de dois grupos de elementos:

- Elementos de polarização.
- Elementos de bloqueio da componente *cc* do sinal.

Os elementos de polarização são aqueles que têm por finalidade estabelecer o ponto de operação do transistor, e incluem os resistores de coletor, de base e de emissor, como indicado na **Fig.19**.

Os elementos de bloqueio da componente *cc* do sinal são denominados de **acopladores** e são os transformadores ou os capacitores de entrada e saída mostrados na **Fig.19**.

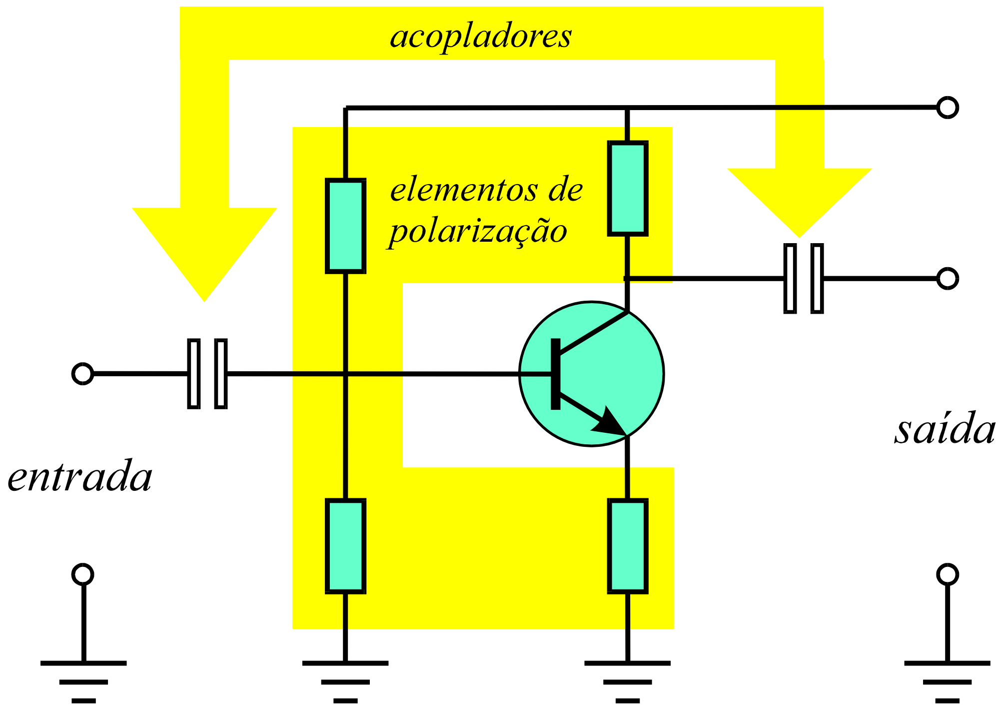


Fig.19 Elementos de um amplificador a transistor na configuração emissor comum.

DESACOPLAMENTO DO EMISSOR

Nos estágios amplificadores em que o emissor está conectado diretamente ao terra, como mostrado na **Fig.20**, o ganho é elevado, geralmente maior do que 50. Como desvantagem, aquele tipo de circuito tem baixa estabilidade térmica, sendo adequado para estágios amplificadores que não estejam sujeitos a variações muito amplas de temperatura. Por outro lado, o resistor de emissor, quando incluído no circuito, reduz sensivelmente o seu ganho, que passa a se situar tipicamente em um valor próximo a 10.

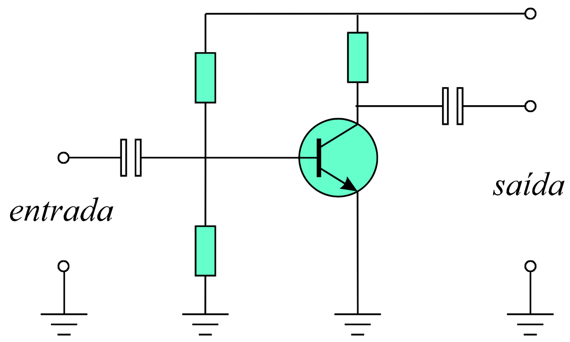


Fig.20 Amplificador com o emissor do transistor conectado ao terra.

Em um estágio amplificador polarizado por divisor de tensão a estabilidade térmica pode ser melhorada acrescentando-se um resistor de emissor ao circuito. Por outro lado, essa modificação reduz o ganho do estágio.

Para otimizar o desempenho do amplificador, utiliza-se um **capacitor de desacoplamento** conectado em paralelo com o resistor de emissor, conforme indicado na **Fig.21**, que permite a obtenção de um estágio amplificador termicamente estável e com ganho elevado.

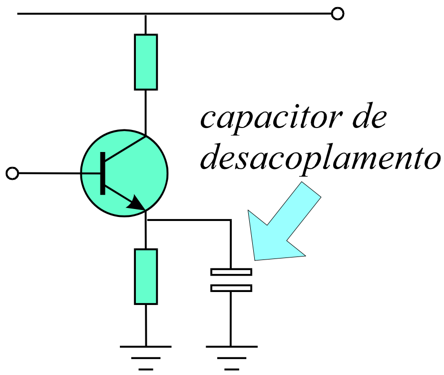


Fig.21 Amplificador com capacitor de desacoplamento conectado em paralelo com o resistor de emissor.

Se o capacitor de desacoplamento tiver uma reatância muito baixa, ele atuará como um curto-circuito apenas em relação à componente variável do sinal amplificado.

Como ilustrado na **Fig.22**, **na ausência de um sinal de entrada** o capacitor comporta-se como um circuito aberto, não alterando as tensões de polarização, e portanto o ponto de operação do circuito.

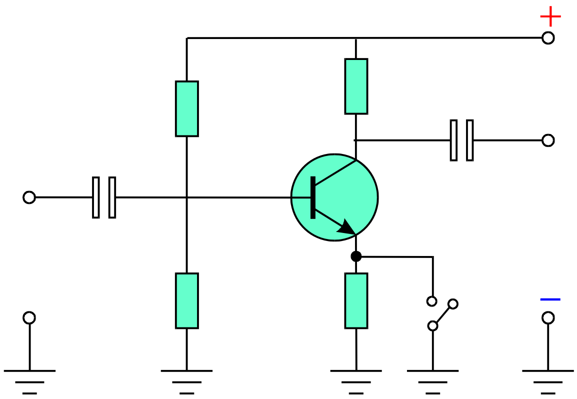


Fig.22 Atuação do capacitor de desacoplamento na ausência de um sinal na entrada do circuito amplificador.

Aplicando-se um sinal na entrada do amplificador, o capacitor comporta-se idealmente como um curto-circuito em relação à parcela variável da tensão do emissor, como ilustrado na **Fig.23**. Do ponto de vista da parcela variável da tensão do emissor, tudo se passa como se o emissor estivesse ligado diretamente ao terra. Dessa forma pode-se obter um estágio amplificador com ganho da ordem de 50 e com boa estabilidade térmica.

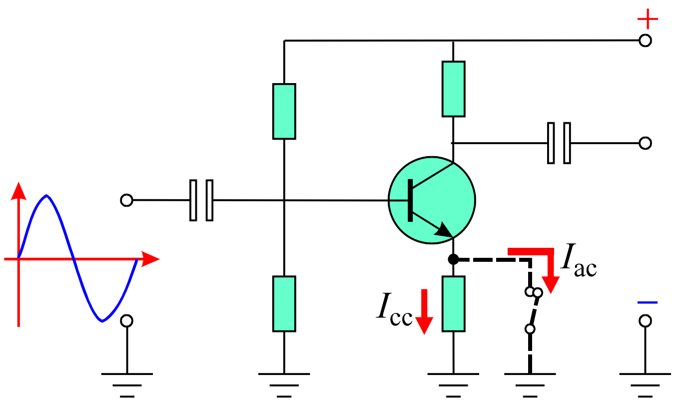


Fig.23 Atuação do capacitor de desacoplamento na presença de um sinal na entrada do circuito amplificador.

Para que o capacitor realize o desacoplamento adequado, sua reatância deve ser pequena.. Na prática, na menor freqüência de operação do amplificador, o valor da reatância deve ser pelo menos 10 vezes menor do que a resistência do resistor de emissor. Por essa razão, capacitores de desacoplamento utilizados em amplificadores, são do tipo eletrolítico com capacitâncias entre 1μF e 50μF.

A **Fig.24** mostra um estágio amplificador completo, com os elementos de polarização, de acoplamento e de desacoplamento.

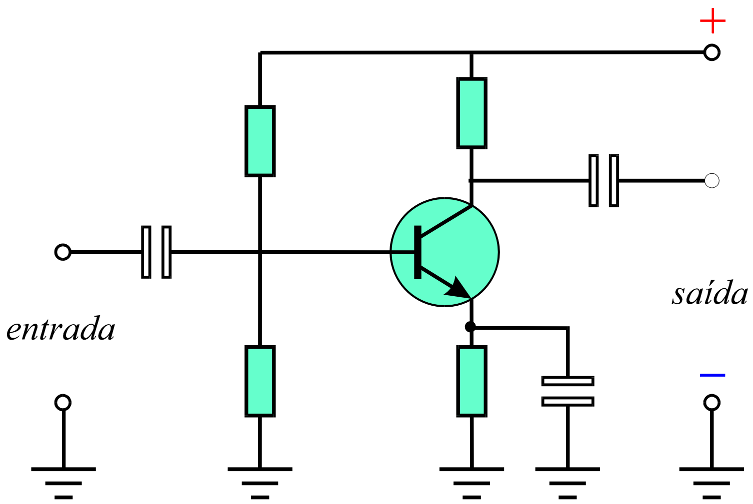


Fig.24 Estágio amplificador completo.

PARÂMETROS DO ESTÁGIO AMPLIFICADOR

Os parâmetros comumente utilizados na caracterização de um estágio amplificador são os seguintes:

- Ganho de corrente.
- Ganho de tensão.
- Impedância de entrada.
- Impedância de saída.

GANHO DE CORRENTE

O ganho de corrente de um estágio amplificador, representado pelo parâmetro A_I, é definido como sendo a relação entre as variações das correntes de saída ΔI_S, e de entrada ΔI_{ent}, ou equivalentemente

$$A_I = \frac{\Delta I_S}{\Delta I_{ent}} \quad (4)$$

O ganho de corrente do estágio amplificador na configuração emissor comum equivale ao próprio ganho de corrente do transistor β, e pode ser considerado genericamente como alto, com um fator de algumas dezenas.

GANHO DE TENSÃO

O ganho de tensão de um estágio amplificador é definido pela relação

$$A_V = \frac{\Delta V_S}{\Delta V_{ent}} \qquad (5)$$

Na configuração emissor comum o ganho de tensão é fortemente dependente dos valores dos elementos polarizadores e das correntes de polarização, dificultando a determinação analítica desse parâmetro. Entretanto, o ganho de tensão pode ser obtido diretamente, medindo-se as tensões de saída e de entrada com um osciloscópio.

Em termos de classificação genérica, o ganho de tensão na configuração emissor comum também pode ser considerado como alto, tendo um fator típico de algumas dezenas.

IMPEDÂNCIA DE ENTRADA

A impedância de entrada Z_i é a resistência oferecida pelos terminais de entrada do amplificador à passagem da corrente associada ao sinal, como ilustrado na **Fig.25**.

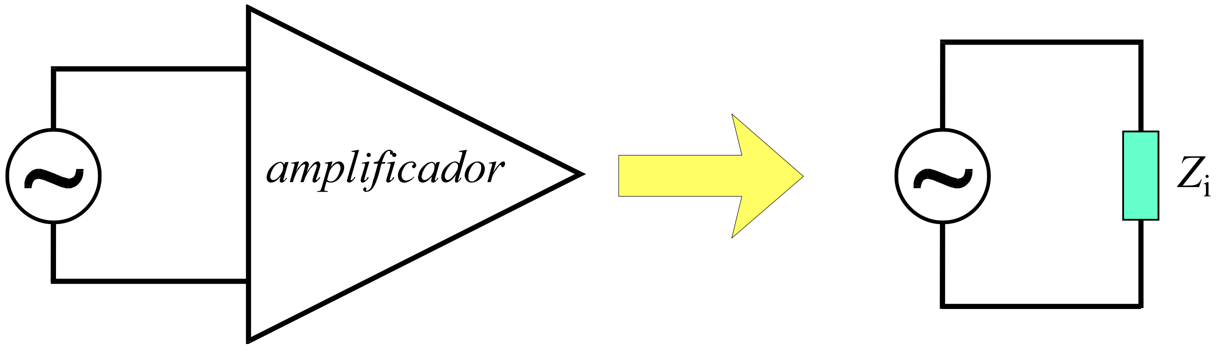


Fig.25 Impedância de entrada de um amplificador.

A impedância de entrada de amplificadores na configuração emissor comum é geralmente de algumas centenas de ohms, sendo classificada genericamente como média.

A determinação teórica da impedância de entrada requer a manipulação matemática das equações do circuito amplificador. Para evitar as complicações envolvidas no tratamento analítico, pode utilizar-se uma técnica simples de medição desse parâmetro. A técnica requer o emprego de um potenciômetro conectado em série a um dos terminais de entrada do estágio amplificador, como mostrado na **Fig.26**.

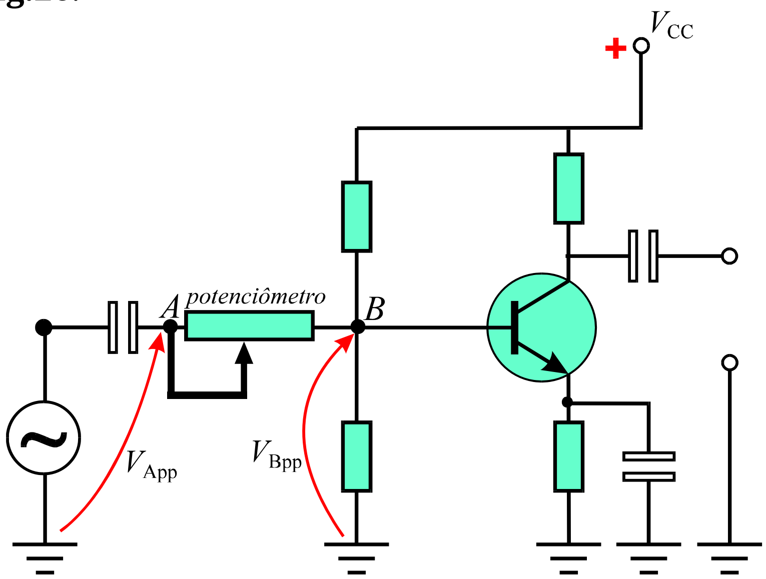


Fig.26 Técnica de medição da impedância de entrada de um amplificador.

A técnica de medição consiste na execução dos seguintes passos:

- Selecionando um valor nulo para a resistência do potenciômetro mostrado na **Fig.25**, ajusta-se a tensão pico a pico no ponto *A* para um valor pré-definido V_{App}.
- Ajusta-se então o potenciômetro até que a tensão no ponto *B*, V_{Bpp} diminua para a metade da tensão aplicada ao ponto *A*, ou seja, na condição

$$V_{Bpp} = \frac{V_{App}}{2}$$

Quando essa condição for atingida, a resistência do potenciômetro torna-se igual à impedância de entrada do estágio, pois metade da tensão é aplicada entre os terminais do potenciômetro, com a outra metade residindo entre os terminais de entrada do circuito equivalente mostrado na **Fig.25**. Pode-se, então, desconectar o potenciômetro do circuito, sem alterar a posição do cursor, e medir a sua resistência que fornece o parâmetro Z_i do amplificador.

O conhecimento da impedância de entrada de um amplificador é importante para a obtenção do correto casamento de impedâncias na conexão com uma fonte de sinal.

IMPEDÂNCIA DE SAÍDA

O conhecimento da impedância de saída de um amplificador, representada pelo parâmetro Z_o, também é importante para a conexão adequada da saída do estágio com outro circuito. O valor da impedância de saída pode ser determinado analiticamente, a partir de um tratamento matemático das equações do circuito. Entretanto, o valor pode também ser medido de uma forma simples, utilizando-se um potenciômetro na saída do circuito, conforme indicado na **Fig.27**.

A técnica de medição consiste na execução dos seguintes passos:

- Com a chave do circuito da **Fig.27** desligada, mede-se a tensão pico a pico V_{App} do sinal presente no ponto *A*.

- Liga-se a chave e ajusta-se então o potenciômetro até que a tensão V_{App} diminua para a metade de seu valor inicial

Quando essa condição for atingida, a resistência do potenciômetro tem o mesmo valor da impedância de saída do estágio.

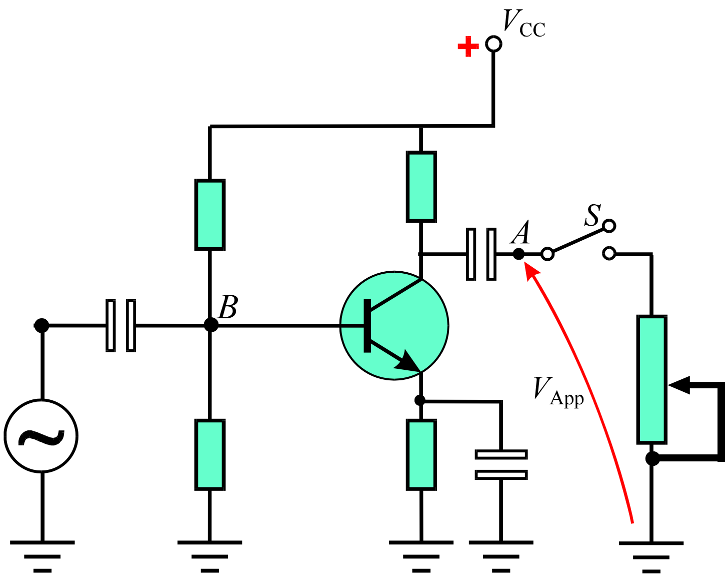


Fig.27 Técnica de medição da impedância de saída de um amplificador.

Nos processos de medição dos parâmetros Z_i e Z_o o gerador de sinais deve ser ajustado de forma a não distorcer o sinal de saída, evitando assim a obtenção de valores incorretos para aqueles parâmetros.

Os estágios amplificadores em emissor comum têm uma impedância de saída que pode ser classificada como alta, podendo atingir alguns milhares de ohms.

As características principais de um amplificador na configuração emissor comum estão sumarizadas na **Tabela 1**.

Tabela 1 Ordens de grandeza dos parâmetros de um amplificador na configuração emissor comum.

Parâmetro	**Ordem de grandeza**
A_I	Alto (dezenas de vezes)
A_V	Alto (dezenas de vezes)
Z_i	Média (centenas de ohms)
Z_o	Alta (centenas a milhares de ohms)

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. O que se entende por sinal elétrico?
2. Que característica de um sinal senoidal é modificada após sua amplificação e quais características permanecem inalteradas?
3. Quais são os tipos de estágios amplificadores e quais são os seus ganhos típicos?
4. Quais são as características principais de um estágio amplificador na configuração emissor comum?
5. Em um estágio amplificador na configuração emissor comum, quais as relações de fase entre a corrente e tensão de coletor e a tensão de entrada?
6. Como pode ser realizado o bloqueio da componente *cc* de um sinal entre estágios amplificadores?
7. Que efeitos são produzidos pela adição de um resistor de emissor em um amplificador na configuração emissor comum?
8. A que propósito serve o capacitor de desacoplamento da **Fig.21**?
9. Quais são os parâmetros representativos e seus valores típicos em um amplificador na configuração emissor comum?

BIBLIOGRAFIA

CIPELLI, Antônio Marco Vicari & SANDRINI, Valdir João. Teoria e desenvolvimento de projetos de circuitos eletrônicos. 7.ed. São Paulo, Érica, 1983 580p.

MILLMAN, Jacob & HALKIAS, Chrisots C. Eletrônica: dispositivos e circuitos. Trad.. Elédio José Robalinho e Paulo Elyot Meirelles Villela. São Paulo, McGraw Hill do Brasil. 1981. il. v.2

SENAI/DN. Reparador de circuitos Eletrônicos; Eletrônica básica I. Rio de Janeiro. (Coleção básica SENAI. Módulo 1)

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Introdução

Os transistores podem ser utilizados na construção de estágios amplificadores, como por exemplo, aqueles na configuração emissor comum, já descritos anteriormente.

Outras possibilidades existem para se configurar o circuito que compõe o estágio amplificador, incluindo circuitos transistorizados nas configurações base e coletor comum. As propriedades e aplicações dos circuitos arranjados nessas duas configurações diferem daquelas estudadas anteriormente.

Este fascículo trata do estágio amplificador na configuração base comum, fornecendo uma descrição de suas características e propriedades principais. O conhecimento de configurações alternativas de estágios amplificadores objetiva fornecer ao leitor as informações necessárias à escolha do tipo de circuito amplificador que mais se adapta a uma dada aplicação.

Para a boa compreensão do conteúdo e desenvolvimento das atividades contidas neste fascículo, o leitor deverá estar familiarizado com os conceitos relativos a:

- Transistor bipolar: relação entre parâmetros de circuito.
- Amplificador na configuração emissor comum.

Amplificador em base comum

Um transistor com terminais conectados na configuração base comum, mostrada na **Fig.1**, permite confeccionar amplificadores de alto ganho de tensão.

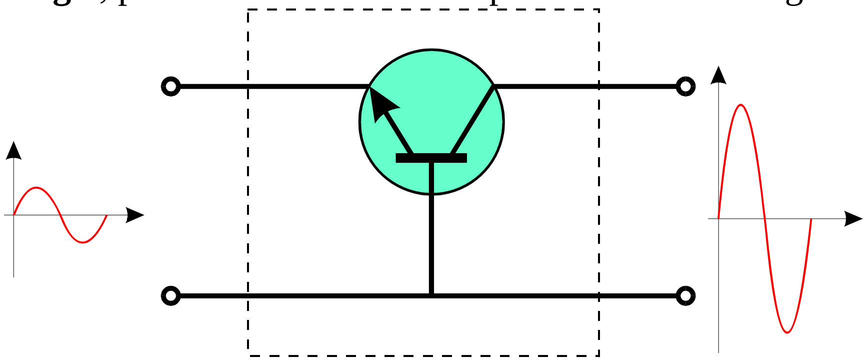


Fig.1 Transistor na configuração base comum.

A forma mais simples do estágio amplificador com transistor na configuração base comum utiliza duas fontes de alimentação, conforme mostrado na **Fig.2**.

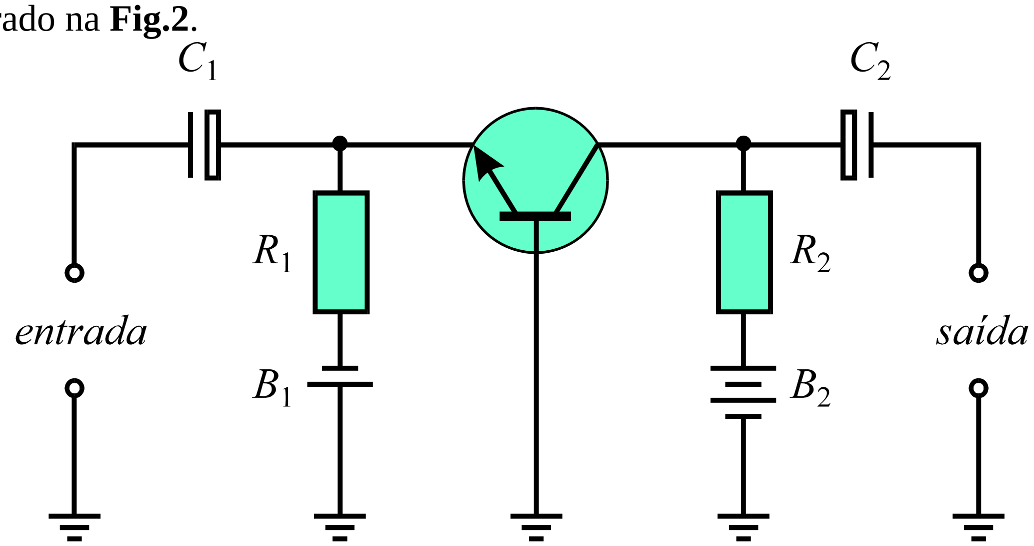


Fig.2 Amplificador com transistor na configuração base comum empregando duas baterias.

Na forma mostrada na **Fig.2**, o transistor fica polarizado na região ativa com as baterias desempenhando as seguintes funções:

- B_1: polariza diretamente a junção base-emissor.
- B_2: polariza inversamente a junção base-coletor.

O estágio amplificador com transistor na configuração base comum pode também ser montado com apenas uma fonte de alimentação, conforme mostrado na **Fig.3**.

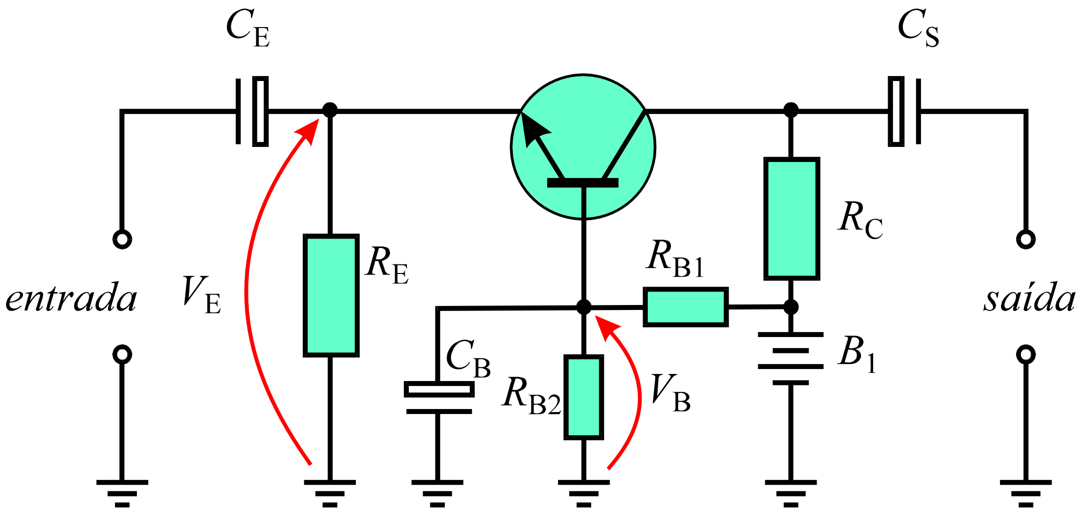


Fig.3 Amplificador com transistor na configuração base comum empregando apenas uma bateria.

São os seguintes os elementos de circuito mostrados na **Fig.3**:

- R_E: resistor de emissor.
- R_C: resistor de coletor.
- C_E: capacitor de acoplamento de entrada.
- C_S: capacitor de acoplamento de saída.
- C_B: capacitor de desacoplamento de base.
- R_{B1} e R_{B2}: elementos do divisor de tensão.

Para um sinal *ac* de entrada, pode utilizar-se o modelo ideal de um elemento em curto em substituição a cada capacitor do circuito da **Fig.3**. Em particular, o terminal da base do transistor permanece efetivamente aterrado e o estágio pode ser representado pelo circuito equivalente mostrado na **Fig.4**.

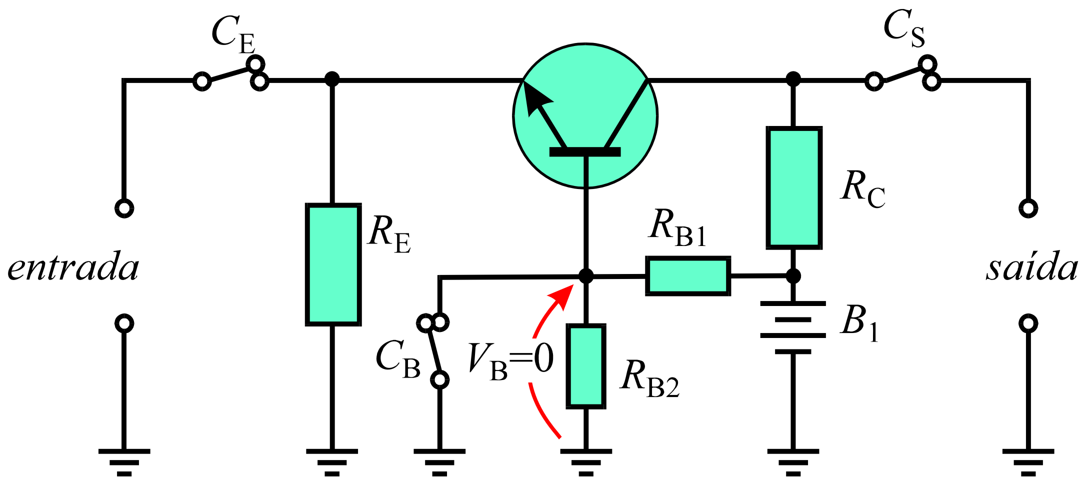


Fig.4 Circuito equivalente do estágio amplificador da **Fig.3** para um sinal *ac* de entrada.

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O funcionamento do amplificador em base comum baseia-se na influência exercida pelo sinal de entrada sobre a tensão base-emissor do transistor. Na análise do comportamento do circuito deve-se considerar que **no amplificador com transistor na configuração base comum da Fig.3, o potencial V_B permanece constante**. O valor de V_B é fixado pelo divisor de tensão e pelo capacitor de acoplamento, mostrados na **Fig.3**.

Na ausência de um sinal de entrada, os parâmetros elétricos do circuito são aqueles obtidos no seu ponto de operação. A partir dessa consideração, e notando que na ausência de um sinal de entrada, os parâmetros elétricos do circuito são aqueles definidos no ponto de operação, pode analisar-se o comportamento do amplificador em duas situações:

- Com sinal de entrada positivo.
- Com sinal de entrada negativo.

COM SINAL DE ENTRADA POSITIVO

Quando um sinal positivo é aplicado à entrada do circuito, conforme ilustrado na **Fig.5,** ocorre um aumento da tensão no resistor de emissor, uma vez que

$$V_E = V_{EQ} + V_{ent}$$

onde V_{EQ} é o valor quiescente da tensão no resistor de emissor.

Como o potencial no terminal da base é fixo, o aumento em V_E provoca a redução na tensão V_{BE}, diminuindo a corrente I_B injetada na base do transistor. Esta por sua vez produz um decréscimo na corrente de coletor I_C.

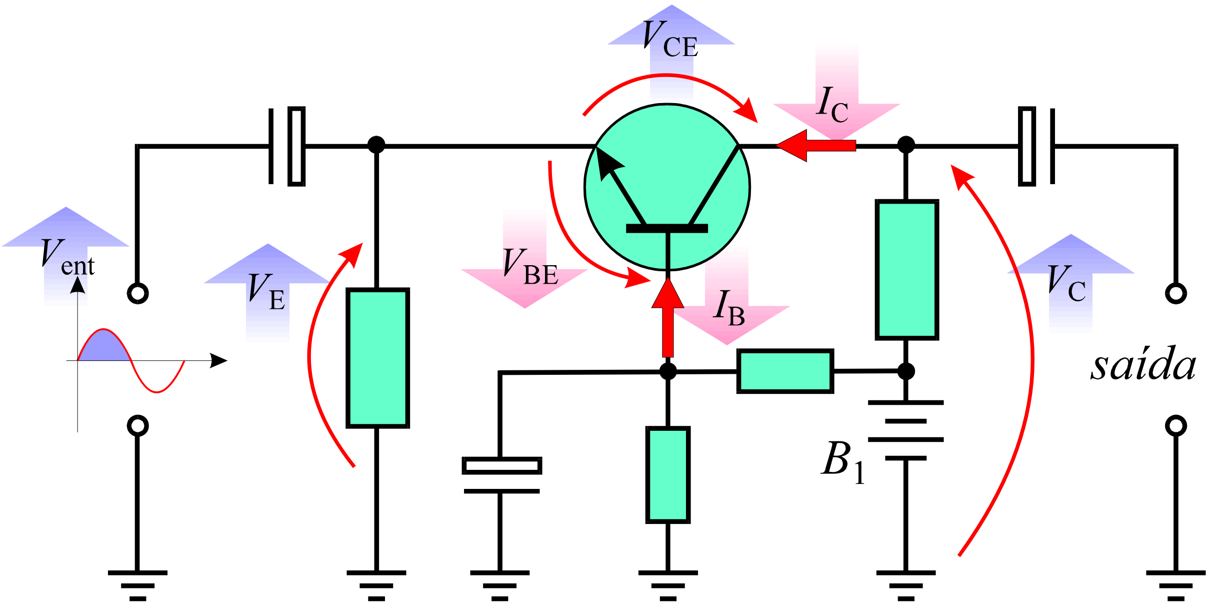
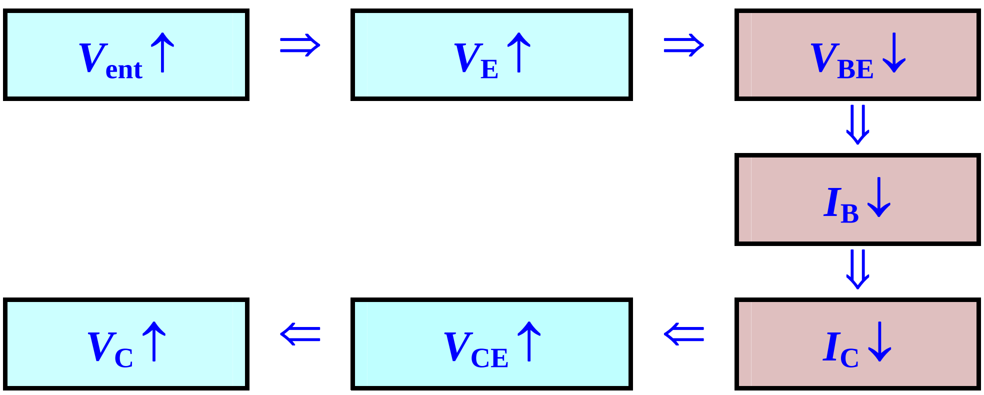


Fig.5 Seqüência de eventos decorrentes da aplicação de um sinal positivo à entrada do amplificador.

A seqüência de eventos ilustrada na **Fig.5** pode ser representada de acordo com o diagrama:



Dessa forma uma versão amplificada do semiciclo positivo do sinal de entrada é transferida para a saída do circuito, conforme ilustrado na **Fig.6**.

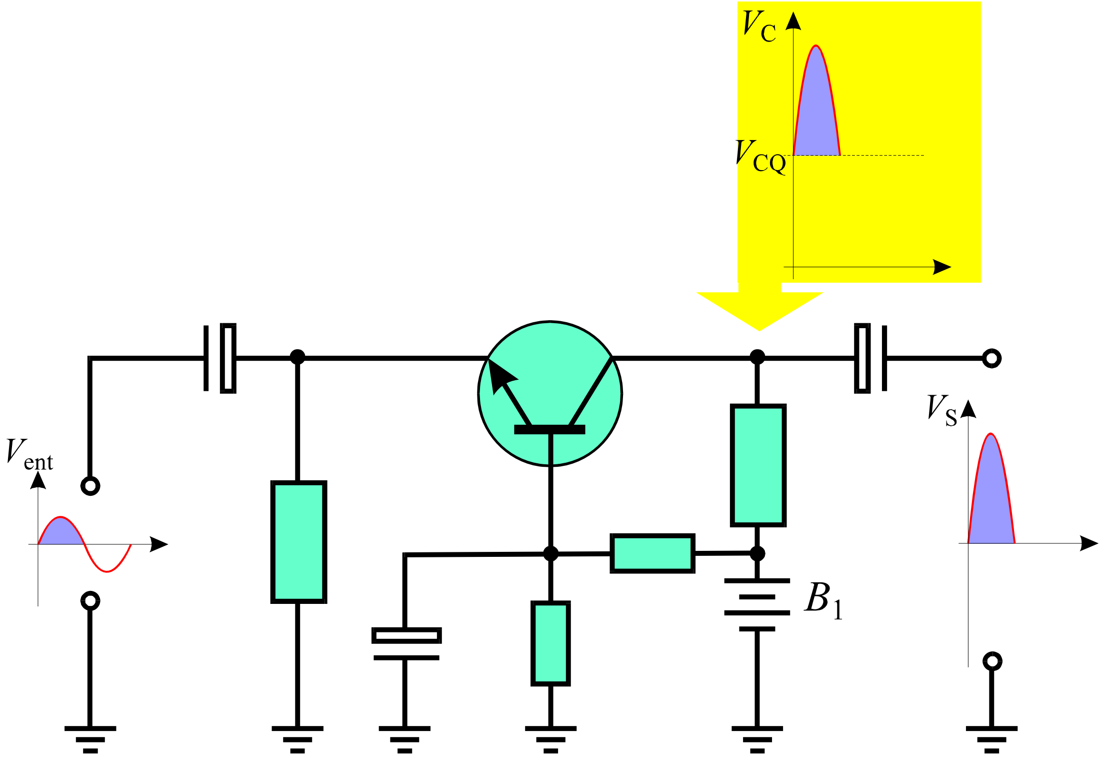


Fig.6 Tensão de saída durante o semiciclo positivo do sinal de entrada.

COM SINAL DE ENTRADA NEGATIVO

Utilizando uma análise semelhante àquela conduzida anteriormente, a existência de um sinal negativo na entrada do circuito amplificador produz a seqüência de eventos ilustrada na **Fig.7**.

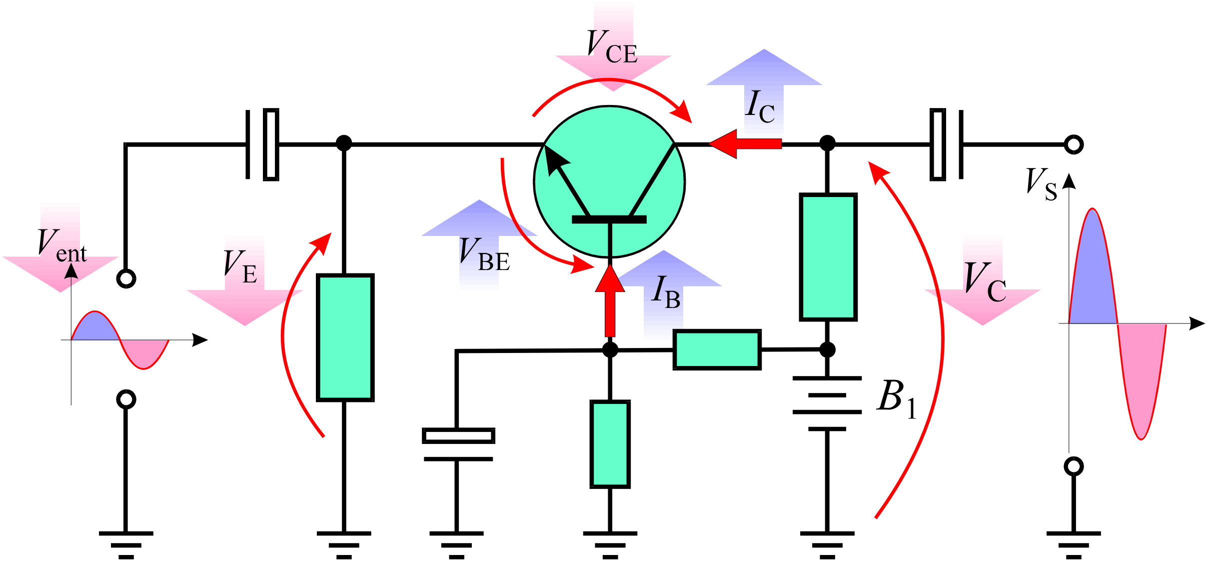
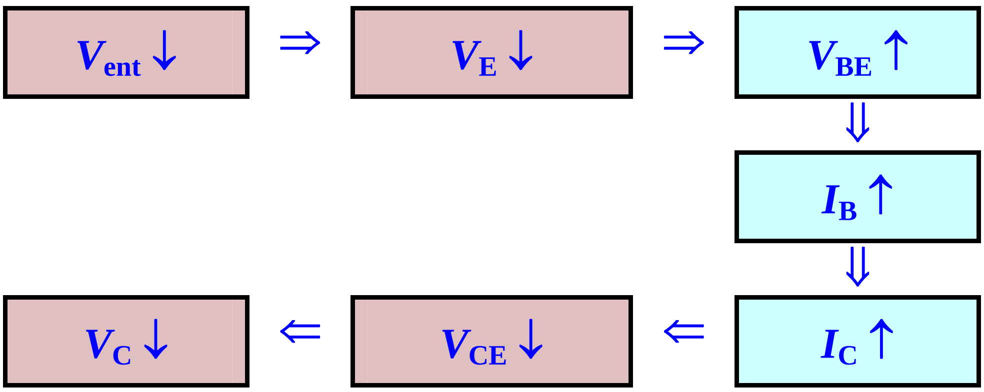


Fig.7 Seqüência de eventos decorrentes da aplicação de um sinal negativo à entrada do amplificador.

A seqüência de eventos ilustrada na **Fig.7** está representada no diagrama a seguir:



Dessa forma, em ambos os semiciclos considerados, a tensão de saída do circuito é uma versão amplificada da tensão associada ao sinal de entrada.

A **Fig.8** mostra a dependência no tempo dos parâmetros V_{ent}, V_{CE} e I_C durante um ciclo completo do sinal de entrada, e demonstra as seguintes características inerentes aos estágios amplificadores a transistor na configuração base comum:

- A dependência temporal da corrente de coletor encontra-se deslocada de um semiciclo em relação àquela associada ao sinal de entrada.

- A tensão de coletor é uma versão amplificada com a mesma fase da tensão associada ao sinal de entrada.

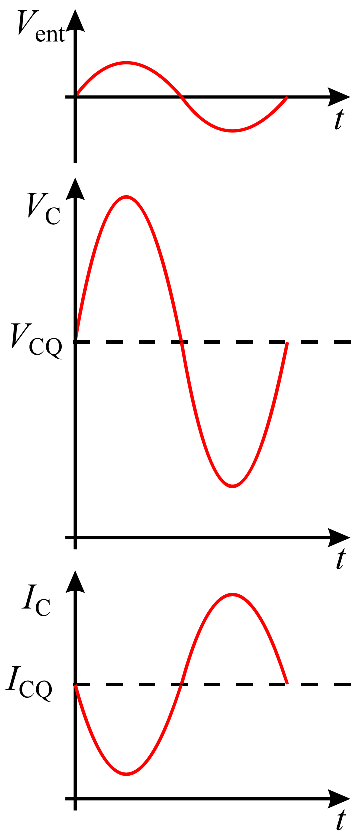


Fig.8 Dependência temporal dos parâmetros V_{ent}, V_{CE} e I_C , para o amplificador em base comum.

PARÂMETROS DO ESTÁGIO AMPLIFICADOR EM BASE COMUM

GANHO DE CORRENTE

No estágio amplificador com transistor na configuração base comum as correntes de entrada e de saída correspondem às correntes de emissor e de coletor, respectivamente. O ganho de corrente, definido pela relação

$$A_I = \frac{\Delta I_{\text{saída}}}{\Delta I_{\text{entrada}}}$$

para o amplificador em base comum se torna

$$A_I = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E} \qquad (1)$$

Como ΔI_C é sempre menor do que ΔI_E, conclui-se da **Eq.(1)**, que o ganho de corrente é sempre menor do que 1, situando-se tipicamente na faixa $0{,}95 \leq A_I \leq 0{,}999$. Na prática pode-se portanto considerar o ganho de corrente em base comum como sendo unitário, i.e., $A_I \approx 1$.

GANHO DE TENSÃO

Os estágios amplificadores em base comum utilizam geralmente um resistor de coletor, cujo valor de resistência pode variar tipicamente de várias dezenas a várias centenas de quiloohms, resultando em ganhos de tensão que podem chegar a algumas centenas. Portanto, o ganho de tensão do estágio amplificador em base comum pode ser classificado, genericamente, como sendo **alto**.

IMPEDÂNCIA DE ENTRADA

Nos estágios amplificadores o sinal de entrada é aplicado ao terminal do emissor e a base é aterrada diretamente ou através de um capacitor de desacoplamento, como mostrado na **Fig.3**. Dessa forma, o sinal de entrada é aplicado diretamente à junção base-emissor do transistor.

Como durante a operação normal, a junção base-emissor permanece polarizada diretamente, a impedância de entrada é de no máximo, algumas

dezenas de ohms. Portanto, a impedância de entrada para esse tipo de estágio amplificador pode ser classificada, genericamente, como sendo **baixa**.

A impedância de entrada pode ser medida com o emprego de um potenciômetro na entrada como ilustrado na **Fig.9**, seguindo os mesmos princípios já descritos anteriormente para a medição desse parâmetro no estágio amplificador em emissor comum.

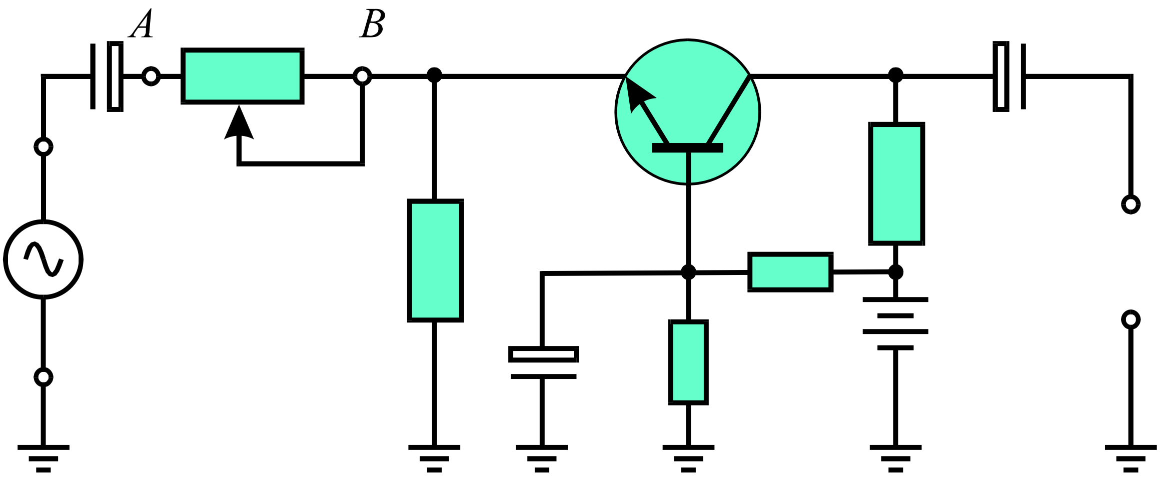


Fig.9 Técnica utilizada para medição da impedância de entrada de um amplificador em base comum.

IMPEDÂNCIA DE SAÍDA

Para qualquer amplificador, a impedância de saída é definida como a relação entre **variações** de tensão e de corrente, ou seja,

$$Z_o = \frac{\Delta V_C}{\Delta I_C} \qquad (2)$$

Devido ao alto valor do parâmetro R_C de um estágio amplificador em base comum, grandes variações na tensão de saída são produzidas por pequenas variações na corrente de coletor. Dessa forma, a **Eq.(2)** indica que a impedância de saída para esses tipos de estágios amplificadores deve ser **alta**, situando-se na faixa de dezenas a centenas de quiloohms.

A **Tabela 1** resume as principais características de um estágio amplificador a transistor na configuração base comum.

Tabela 1 Amplificador em base comum: características principais.

Parâmetro	Valor ou faixa de valores típicos
A_I	≈ 1
A_v	alto (dezenas a centenas de vezes)
Z_i	baixa (dezenas de ohms)
Z_o	alta (dezenas a centenas de quiloohms)

APLICAÇÕES

Caracteristicamente os estágios amplificadores em base comum apresentam baixa impedância de entrada e alta impedância de saída. Essas propriedades permitem que esses circuitos sejam utilizados como elementos casadores de impedância, podendo interligar um estágio de baixa impedância de saída a outro de alta impedância de entrada, conforme ilustrado na **Fig.10**.

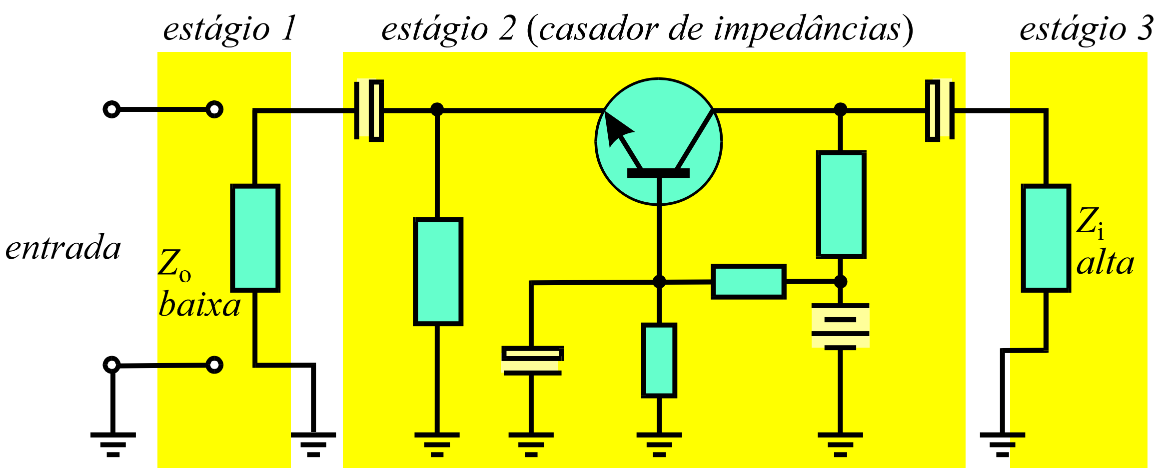


Fig.10 Emprego do estágio amplificador em base comum na interligação de circuitos de impedâncias distintas.

Outra aplicação característica dos amplificadores em base comum ocorre na confecção de circuitos para operação em freqüências acima de 50 MHz, tais como aqueles utilizados em sistemas de comunicações convencionais.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Faça um desenho de um transistor na configuração base comum.

2. Quais são as faixas típicas de valores dos parâmetros associados ao amplificador na configuração base comum.

3. Cite algumas aplicações que fazem uso do amplificador na configuração base comum.

BIBLIOGRAFIA

MALVINO, Albert Paul. Eletrônica. São Paulo, McGraw-Hill, 1986. 520p. il.

SENAI/DN Reparador de Circuitos Eletrônicos; eletrônica básica II. Rio de Janeiro. (Coleção Básica SENAI. Módulo 2)

SENAI/DN. Transistores, por Antônio Abel Correia Villela. Rio de Janeiro, Divisão de Recursos Humanos, 1977. 81p. (Publicações Técnicas 7)

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Introdução

Os transistores podem ser utilizados na construção de estágios amplificadores, como por exemplo, aqueles na configuração emissor e base comum, já descritas anteriormente. A terceira possibilidade de confecção de um amplificador utiliza o transistor conectado ao circuito na configuração coletor comum.

Este fascículo trata do estágio amplificador na configuração coletor comum, fornecendo uma descrição de suas características e propriedades principais.

Para a boa compreensão do conteúdo e desenvolvimento das atividades contidas neste fascículo, o leitor deverá estar familiarizado com os conceitos relativos a:

- Transistor bipolar: relação entre parâmetros de circuito.
- Amplificador na configuração emissor comum.
- Amplificador na configuração base comum.

Amplificador em coletor comum

Um transistor com terminais conectados na configuração coletor comum, mostrada na **Fig.1**, permite confeccionar amplificadores de alto ganho de corrente, com um ganho de tensão praticamente unitário.

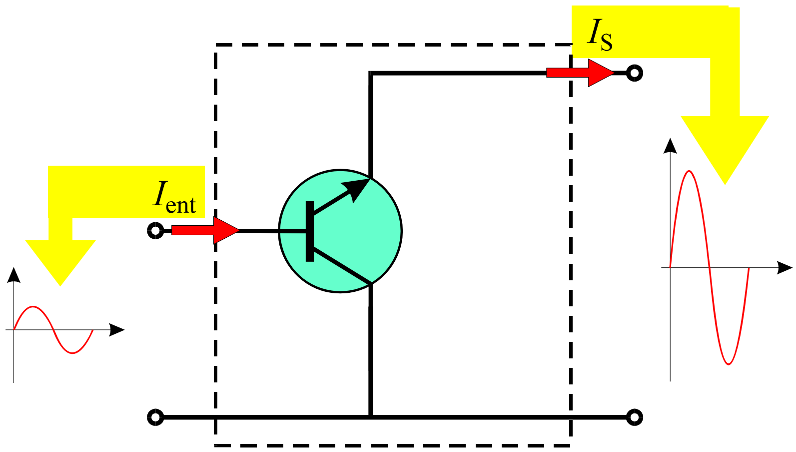


Fig.1 Transistor na configuração coletor comum.

Os amplificadores em coletor comum são empregados geralmente como estágios amplificadores de potência em fontes reguladas e em amplificadores de som.

Um diagrama de circuito típico para esse tipo do estágio amplificador é mostrado na **Fig.2**.

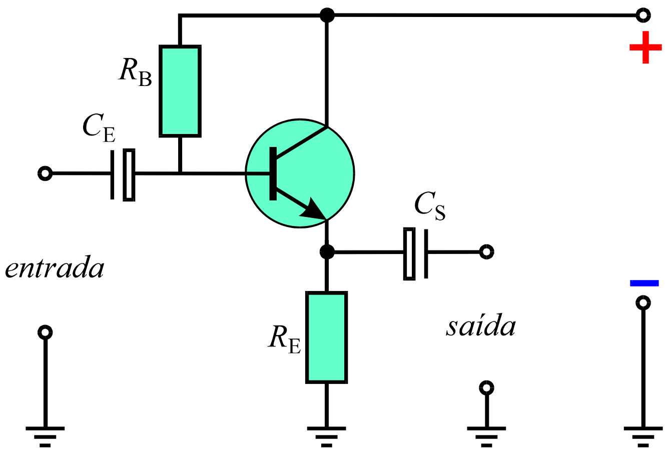


Fig.2 Circuito amplificador com transistor na configuração coletor comum.

Como mostrado na **Fig.2**, o terminal do coletor do transistor fica conectado diretamente à fonte de alimentação e a carga do circuito é conectada ao terminal do emissor. São os seguintes os elementos de circuito mostrados na **Fig.2**:

- R_B: resistor de polarização da base do transistor.
- R_E: resistor de carga do transistor.
- C_E: capacitor de acoplamento de entrada.
- C_S: capacitor de acoplamento de saída.

O terminal do coletor é considerado terminal comum pois a fonte apresenta uma impedância baixíssima na presença de sinais *ca*. Dessa forma, sempre que o circuito amplifica um sinal, o coletor pode ser considerado como estando aterrado, equivalendo portanto a um terminal comum à entrada e à saída do sinal.

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O princípio de funcionamento do circuito da **Fig.2** pode ser descrito considerando inicialmente que o estágio amplificador esteja polarizado no ponto de operação, com as tensões e correntes indicadas na **Fig.3**.

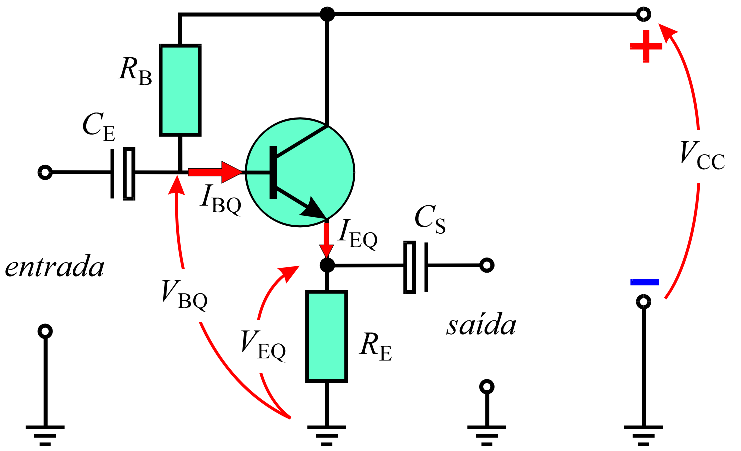


Fig.3 Parâmetros elétricos do amplificador em coletor comum na ausência de um sinal de entrada.

Quando um sinal positivo é aplicado à entrada do circuito, conforme ilustrado na **Fig.4,** ocorre um aumento na tensão de polarização da base, de acordo com a relação

$$V_B = V_{BQ} + V_{ent}$$

onde V_{BQ} é o valor quiescente da tensão no terminal da base.

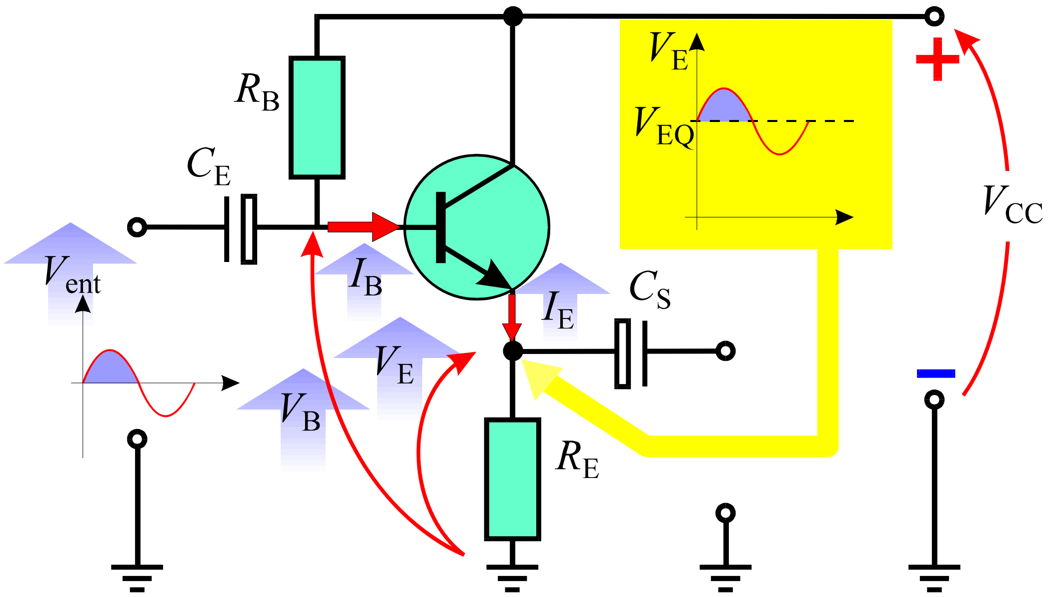


Fig.4 Seqüência de eventos decorrentes da aplicação de um sinal positivo na entrada do amplificador.

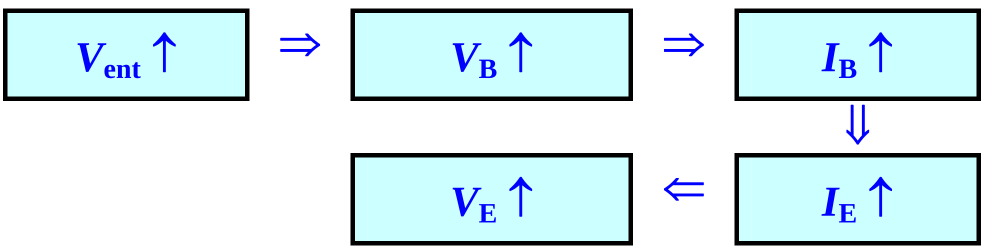
Como indicado na **Fig.4**, o aumento na tensão de base produz um aumento na tensão V_{BE} entre base e emissor, provocando uma elevação na corrente de base I_B. Isso produz um aumento nas correntes de coletor e de emissor do transistor, elevando a queda de tensão no resistor de emissor.

Deve-se observar no entanto que a corrente de emissor aumenta até um valor tal que a tensão no terminal de emissor seja bem próxima à tensão no terminal da base, com a diferença sendo determinada pela tensão de polarização direta da junção base-emissor, ou seja,

$$V_E = V_B - V_{BE}$$

Verifica-se dessa forma que a queda de tensão sobre o resistor de emissor tem a mesma fase do sinal de entrada com uma diferença de amplitude igual a V_{BE}, que para transistores de silício é da ordem de 0,7 V.

A seqüência de eventos ilustrada na **Fig.4** pode ser representada de acordo com o diagrama:



Utilizando uma análise semelhante àquela conduzida anteriormente, a existência de um sinal negativo na entrada do circuito amplificador, produz a seqüência de eventos ilustrada na **Fig.5**.

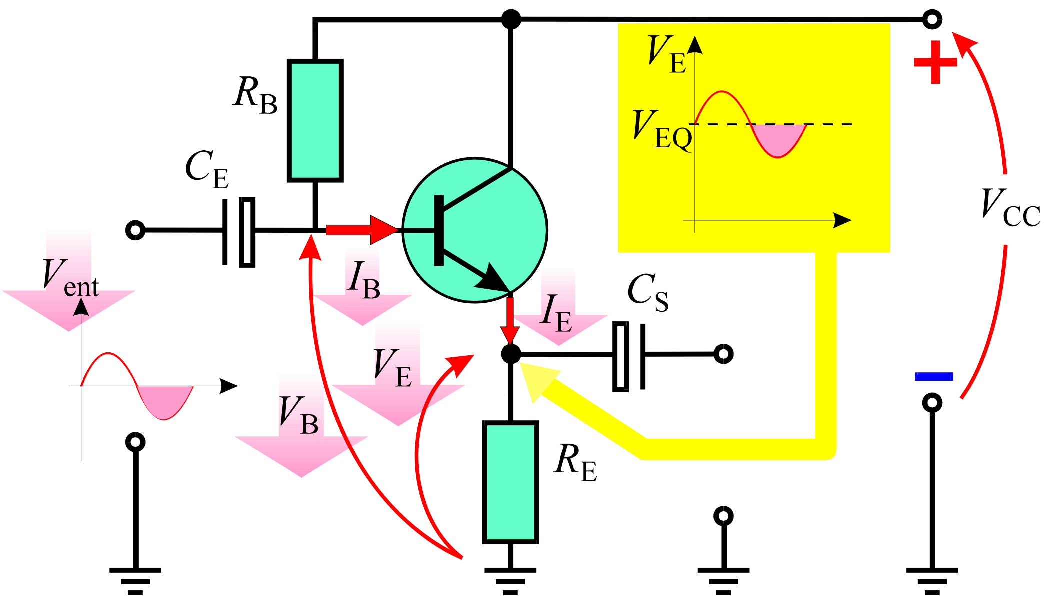


Fig.5 Seqüência de eventos decorrentes da aplicação de um sinal negativo na entrada do amplificador.

A seqüência de eventos ilustrada na **Fig.5** está representada no diagrama a seguir:

$V_{ent}\downarrow \Rightarrow V_B\downarrow \Rightarrow I_B\downarrow$

$\Downarrow$

$V_E\downarrow \Leftarrow I_E\downarrow$

Devido ao fato de a tensão do emissor seguir a tensão da base, o estágio amplificador com transistor na configuração coletor comum é também denominado de **estágio seguidor de emissor**.

PARÂMETROS DO ESTÁGIO AMPLIFICADOR EM COLETOR COMUM

GANHO DE TENSÃO

Considerando que a variação na tensão de saída é praticamente igual à variação na tensão de entrada, conclui-se que o ganho de tensão do estágio amplificador em coletor comum pode ser considerado unitário, ou seja,

$$A_V \approx 1$$

GANHO DE CORRENTE

Para que se desenvolva sobre o resistor de emissor, que é normalmente de baixa resistência, uma tensão de amplitude praticamente igual àquela da base, a corrente de emissor do transistor tende a assumir valores altos, quando comparada com a corrente de base. Isso significa que o circuito apresenta uma amplificação de corrente elevada entre base e emissor.

Como a corrente de coletor é aproximadamente igual à corrente de emissor, o ganho de corrente do circuito amplificador em coletor comum iguala aproximadamente ao ganho de corrente do transistor, ou seja,

$$A_I = \frac{\Delta I_E}{\Delta I_B} \approx \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \beta \quad \Rightarrow \quad A_I = \beta$$

Em geral o ganho de corrente dos estágios amplificadores em coletor comum pode ser considerado como **alto**.

IMPEDÂNCIA DE ENTRADA

Como em qualquer estágio amplificador, a impedância de entrada depende não apenas do transistor, como também de todos os componentes externos de polarização e acoplamento. Isso torna complexa a sua determinação matemática.

De forma genérica pode-se dizer que a impedância de entrada dos estágios em coletor comum é **alta**, situando-se tipicamente na faixa de algumas centenas de ohms a alguns milhares de ohms.

A impedância de entrada pode também ser medida com o emprego de um potenciômetro como ilustrado na **Fig.6**, seguindo os mesmos princípios já descritos anteriormente para a medição daquele parâmetro no estágio amplificador em emissor e base comum.

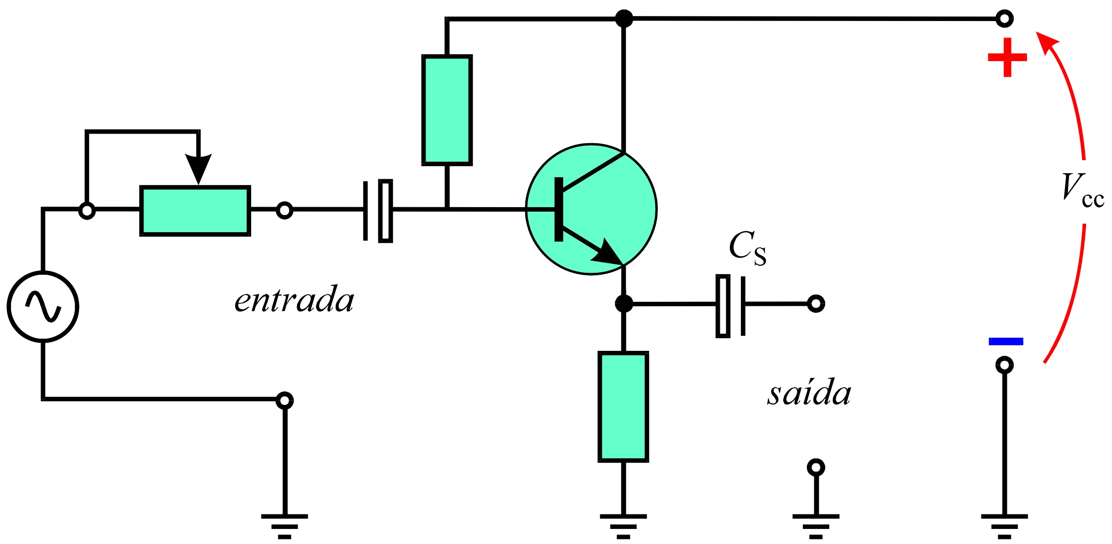


Fig.6 Técnica utilizada para medição da impedância de entrada de um amplificador em base comum.

IMPEDÂNCIA DE SAÍDA

A impedância de saída do estágio amplificador em coletor comum depende de uma série de fatores, incluindo:

- A impedância interna do gerador (ou estágio ligado à entrada).
- Resistor de emissor.
- Corrente de emissor.

De forma geral, a impedância de saída está relacionada à corrente de emissor de acordo com as faixas de valores exibidas na **Tabela 1**.

Tabela 1 Relação aproximada entre a impedância de saída e a corrente de emissor.

Corrente de emissor, I_E	**Z_o(valores aproximados)**
1 mA	25 Ω
de 1 mA a 100 mA	de 25 Ω a 0,25 Ω
de 100 mA a 1 A	de 0,25 Ω a 0,025 Ω

As faixas de valores aproximados listadas na **Tabela 1** mostram que, mesmo em baixas correntes, o valor da impedância de saída é sempre menor que algumas dezenas de ohms.

Considerando ainda que esse tipo de estágio é dificilmente operado com correntes inferiores a 100 mA, a impedância de saída pode ser considerada na prática sempre inferior a 1Ω.

Com base nessas considerações a impedância de saída de um estágio em coletor comum pode ser classificada como **muito baixa**.

Apesar de ser possível medir a impedância de saída do estágio amplificador em coletor comum, essa tarefa requer técnicas sensíveis de medição, tendo em vista os altos valores de corrente no circuito, que impossibilitam o uso de potenciômetros. Adicione-se a isso as dificuldades associadas à medição de resistências inferiores a 1Ω.

A **Tabela 2** resume as principais características de um estágio amplificador a transistor na configuração coletor comum.

Tabela 2 Amplificador em coletor comum: características principais.

Parâmetro	**Valor ou faixa de valores típicos**
A_V	≈ 1
A_I	alto ($A_I \approx \beta$)
Z_i	alta (centenas a milhares de ohms)
Z_o	muito baixa (< 1Ω)

APLICAÇÕES

Existem fundamentalmente três aplicações para os estágios seguidores de emissor:

- Etapa de saída em fontes reguladas.
- Etapa de potência em amplificadores.
- Casamento de impedâncias.

Dessas aplicações, as duas primeiras correspondem àquelas de utilização mais freqüente, razão pela qual merecem uma análise mais detalhada.

ETAPA DE SAÍDA EM FONTES REGULADAS

As características mais importantes em uma fonte são:

- Tensão de saída.
- Impedância interna.

A primeira característica é importante por motivos óbvios. A segunda característica, impedância ou resistência interna, é importante devido à queda de tensão que surge na fonte quando esta fornece corrente a uma carga.

A **Fig.7** mostra dois gráficos que permitem comparar o desempenho de uma fonte para resistências internas distintas. Como pode ser aí observado, a fonte de menor resistência interna mantém a tensão terminal V_0 mais próxima de seu valor nominal, quando a corrente de carga I_0 aumenta. Isso leva a concluir que, quanto menor for a impedância ou resistência interna de uma fonte, melhor será o seu desempenho.

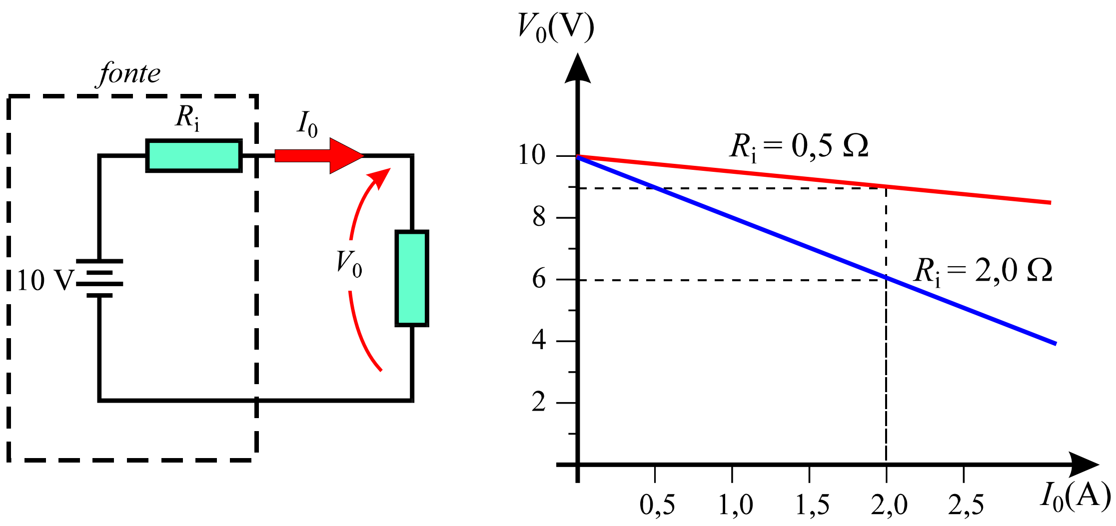


Fig.7 Desempenho de duas fontes de impedâncias distintas perante variações na corrente de carga.

Os estágios amplificadores em coletor comum, que apresentam baixíssima impedância de saída podem portanto ser utilizados como estágios reguladores de tensão em fontes de alimentação.

A **Fig.8** mostra um estágio regulador de tensão a transistor já estudado anteriormente. Esse estágio regulador nada mais é do que um estágio

amplificador em coletor comum em que a tensão no terminal da base é mantida constante pela ação do diodo Zener.

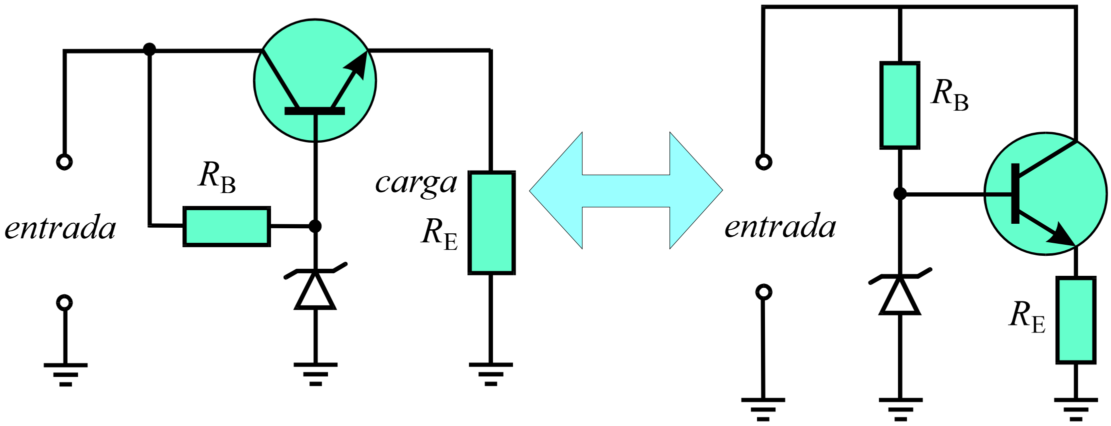


Fig.8 Estágio regulador de tensão e seu equivalente na configuração coletor comum.

ETAPA DE POTÊNCIA EM AMPLIFICADORES DE ÁUDIO

Uma das aplicações mais utilizadas para os amplificadores em coletor comum é na construção de estágios amplificadores de potência para sinais de áudio.

A **Fig.9** mostra o diagrama simplificado de um estágio de potência, também denominado de estágio de classe B, utilizando os transistores T_2 e T_3, ambos na configuração coletor comum.

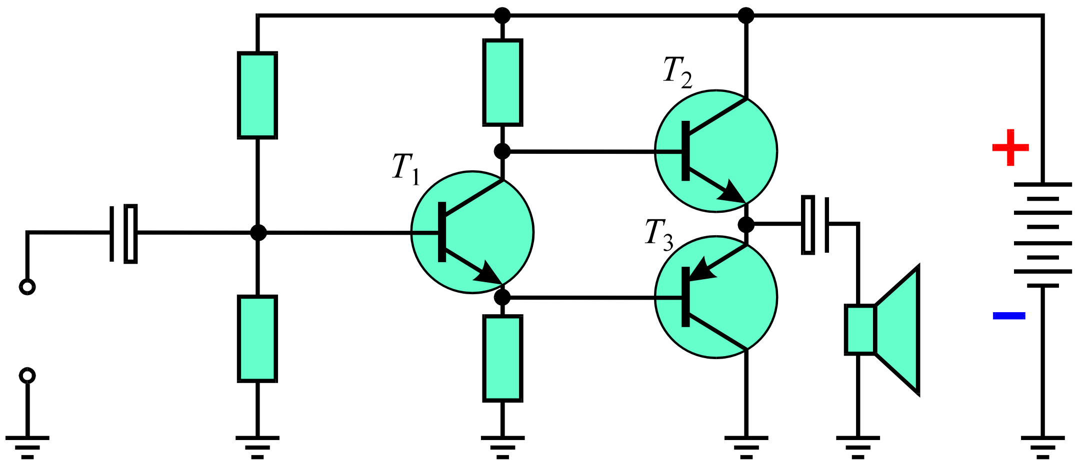


Fig.9 Diagrama simplificado de um estágio de potência.

Considerando inicialmente que um sinal de áudio esteja sendo amplificado, o capacitor em série com o alto-falante pode ser considerado como um curto-circuito, como mostrado na **Fig.10**.

Dessa forma, toda vez que um sinal é amplificado, o alto-falante funciona como carga, estando ligado ao emissor de ambos os transistores. Portanto, a ação isolada de cada transistor conectado ao alto-falante equivale àquela de um estágio amplificador na configuração coletor comum.

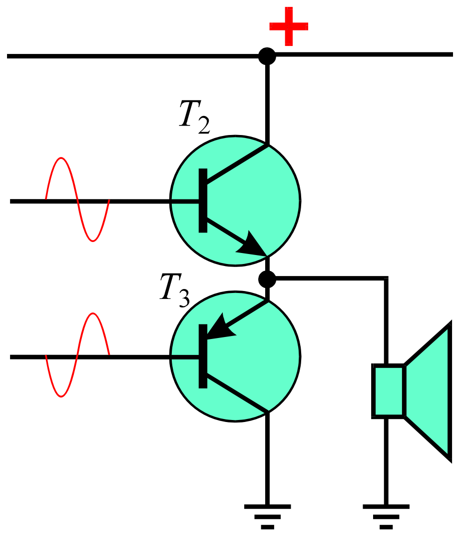


Fig.10 Porção do circuito da **Fig.9**.

Essa configuração do estágio de potência é adequada para conexão direta com o alto-falante por exibir uma baixa impedância de saída, proporcionando assim uma boa transferência de potência . Por essa razão esse tipo de estágio de potência é muito utilizado em aparelhos portáteis, tais como rádios e gravadores.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Faça o desenho de um transistor na configuração coletor comum.
2. Quais são as faixas de valores típicas dos parâmetros associados ao amplificador na configuração coletor comum?
3. Cite algumas aplicações que fazem uso do amplificador na configuração coletor comum.

BIBLIOGRAFIA

MALVINO, Albert Paul. Eletrônica São Paulo, McGraw Hill, 1986. 520p. il.

SENAI/DN. Reparador de Circuitos Eletrônicos; Eletrônica Básica II. Rio de Janeiro. (Coleção Básica SENAI, Módulo 2)

SENAI/DN. Transistores, por Antônio Abel Correia Villela. Rio de Janeiro, Divisão de Recursos Humanos, 1977. 81p. (Publicações Técnicas, 7)

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Introdução

Os aparelhos eletrônicos tais como o rádio e a televisão recebem um *sinal* que é emitido pela antena da estação transmissora. Esse sinal, quando chega ao aparelho receptor, tem uma amplitude muito pequena, geralmente da ordem de alguns microvolts. Antes de assumir sua forma final de som ou imagem, o sinal necessita ser amplificado milhares de vezes. Essa grande amplificação não pode ser realizada por um único estágio amplificador. Utilizam-se, então, diversos estágios amplificadores em seqüência numa forma de ligação denominada de **ligação em cascata**.

O objetivo deste fascículo é apresentar a forma e as características da ligação em cascata entre estágios amplificadores, visando a capacitar o leitor, através da análise de funcionamento, a identificar e corrigir defeitos nesse tipo de circuito composto.

Para a boa compreensão do conteúdo e desenvolvimento das atividades contidas neste fascículo, o leitor deverá estar familiarizado com os conceitos relativos a:

- Amplificador na configuração emissor comum.
- Amplificador na configuração base comum.
- Amplificador na configuração coletor comum.

Amplificadores em cascata

Em muitas ocasiões o ganho de tensão ou de corrente fornecido por um estágio amplificador isolado não é suficiente para uma dada aplicação. Nessas ocasiões costumam-se utilizar dois ou mais amplificadores, interligados de forma a se obterem amplificações sucessivas do sinal, conforme ilustrado na **Fig.1**.

Para se obterem amplificações sucessivas, a conexão entre os estágios amplificadores deve ser feita, como sugerido pela **Fig.1**, ou seja, com a saída do primeiro estágio ligado à entrada do segundo, cuja saída é por sua vez ligada à entrada do terceiro estágio e assim sucessivamente. Esse tipo de ligação entre estágios amplificadores é denominado de **ligação em cascata**.

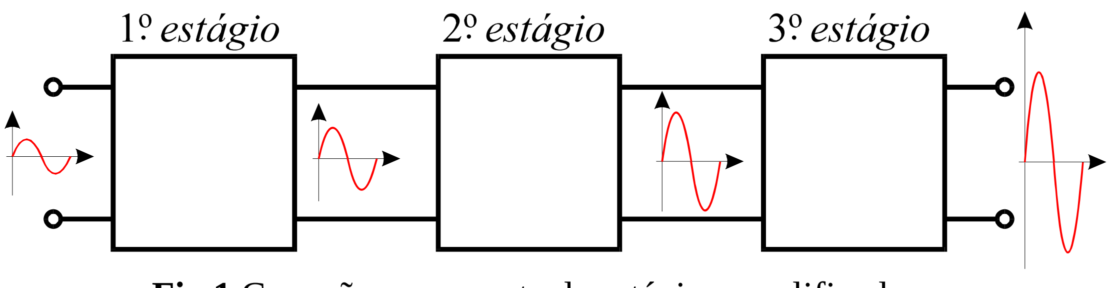


Fig.1 Conexão em cascata de estágios amplificadores.

GANHO TOTAL DE UM AMPLIFICADOR COM ESTÁGIOS EM CASCATA

O ganho total de um amplificador é resultante das amplificações parciais sofridas pelo sinal nos diversos estágios, e pode ser determinado pela razão entre o sinal presente na saída do último estágio amplificador e aquele aplicado à entrada do primeiro estágio amplificador, ou seja,

$$G = \frac{S_{\text{saída}}}{S_{\text{entrada}}} \qquad (1)$$

onde:

- $S_{\text{saída}}$ = amplitude *pp* do sinal na saída do último estágio.
- S_{entrada} = amplitude *pp* do sinal na entrada do primeiro estágio.

Exemplo 1: Para o amplificador de dois estágios mostrado na **Fig.2**, determinar a amplitude *pp* do sinal de saída e o ganho do amplificador.

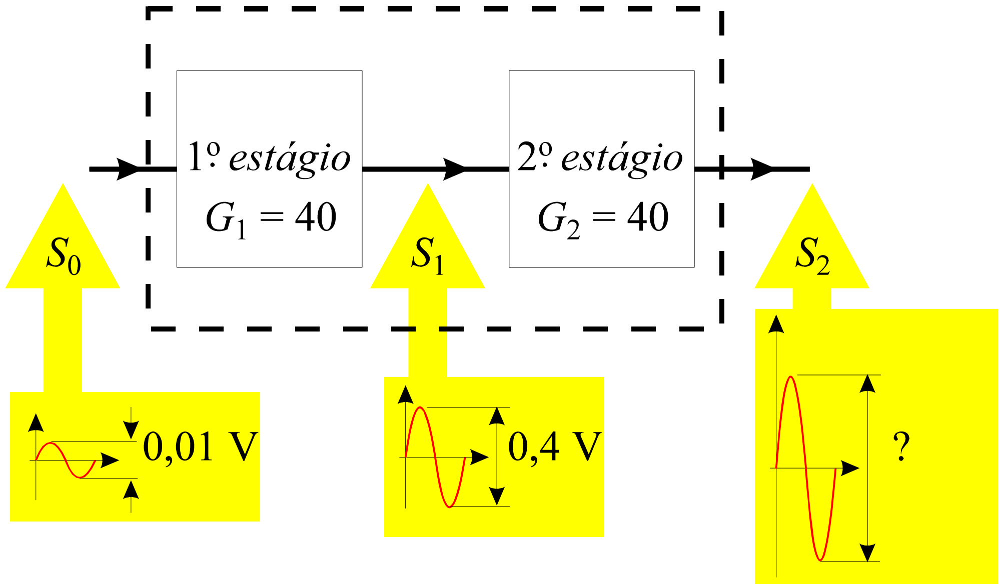


Fig.2 Amplificador de dois estágios referente ao **Exemplo 1**.

O ganho de cada amplificador mostrado na **Fig.2** é 40. Com um sinal de amplitude S_0 = 0,01 Vpp presente na entrada, após a primeira amplificação o sinal terá uma amplitude S_1 dada por

$$S_1 = G_1 S_0 = 40 \times 0{,}01 = 0{,}4\,\text{Vpp}$$

Após a segunda amplificação a amplitude do sinal se torna

$$S_2 = G_2 S_1 = 40 \times 0{,}4 = 16\,\text{Vpp}$$

O ganho do amplificador é portanto

$$G = \frac{S_2}{S_0} = \frac{16\,\text{Vpp}}{0{,}01\,\text{Vpp}} = 1.600$$

O ganho do amplificador poderia também ser obtido, notando que

$$S_2 = G_2 S_1 \text{ , } S_1 = G_1 S_0 \ \Rightarrow \ S_2 = G_2 (G_1 S_0)$$

$$\Rightarrow \ S_2 = (G_2 G_1) S_0$$

e o ganho do amplificador é simplesmente o produto dos ganhos de cada estágio individual:

$$G = G_2 G_1$$

Para o caso presente obtém-se

$$G = 40 \times 40 = 1.600$$

Os resultados obtidos no **Exemplo 1**, permitem expressar o ganho de um amplificador consistindo em vários estágios em cascata através da expressão geral

$$G = G_1 G_2 G_3 ..... \qquad (2)$$

onde G_1, G_2, G_3 ... representam os ganhos individuais de cada estágio do amplificador.

ACOPLAMENTO ENTRE ESTÁGIOS AMPLIFICADORES

Os estágios amplificadores devem ser interligados ou acoplados entre si para que o sinal seja sucessivamente amplificado. Entretanto, o acoplamento da saída de um estágio à entrada do estágio seguinte não pode ser realizado pela simples ligação direta, através de um condutor.

Esse tipo de limitação pode ser verificado analisando-se o acoplamento entre dois estágios amplificadores, conforme ilustrado na **Fig.3**.

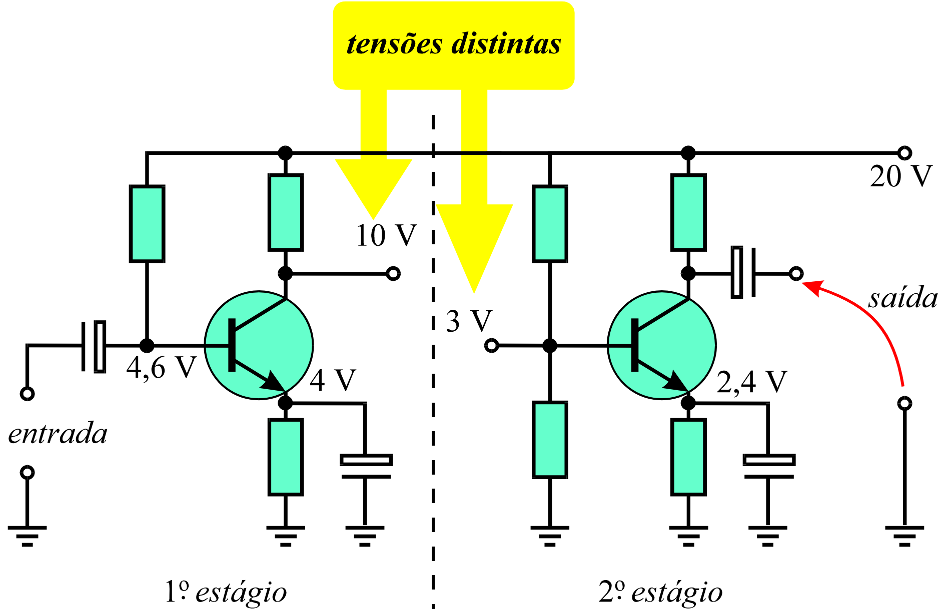


Fig.3 Estágios amplificadores de características distintas.

Como se pode observar na **Fig.3**, no ponto de operação de cada estágio tem-se que:

- A tensão na saída do 1º estágio é de 10 V.
- A tensão na entrada do 2º estágio é de 3V.

Comparando-se os dois valores de tensão, verifica-se que é impossível conectar a saída do primeiro estágio diretamente à entrada do segundo pois a tensão de 10 V seria aplicada à base do transistor do segundo estágio, alterando assim o seu ponto de operação. Conclui-se desse exemplo, que o acoplamento entre estágios deve ser feito de forma que:

- A tensão contínua de saída de um estágio não seja aplicada à entrada do estágio seguinte.
- O sinal de saída de um estágio seja transferido inalterado para a entrada do estágio seguinte.

Pode-se extrair portanto a seguinte conclusão:

O acoplamento entre estágios amplificadores distintos deve ser realizado de forma a bloquear a passagem de tensões contínuas e permitir a passagem de tensões alternadas.

O emprego de capacitores ou transformadores na interconexão entre estágios distintos de um amplificador permite realizar o bloqueio de *cc* e a passagem de sinais *ca*. As **Figs.4** e **5** ilustram como seria realizado o acoplamento entre estágios, com o emprego de um capacitor e de um transformador, respectivamente.

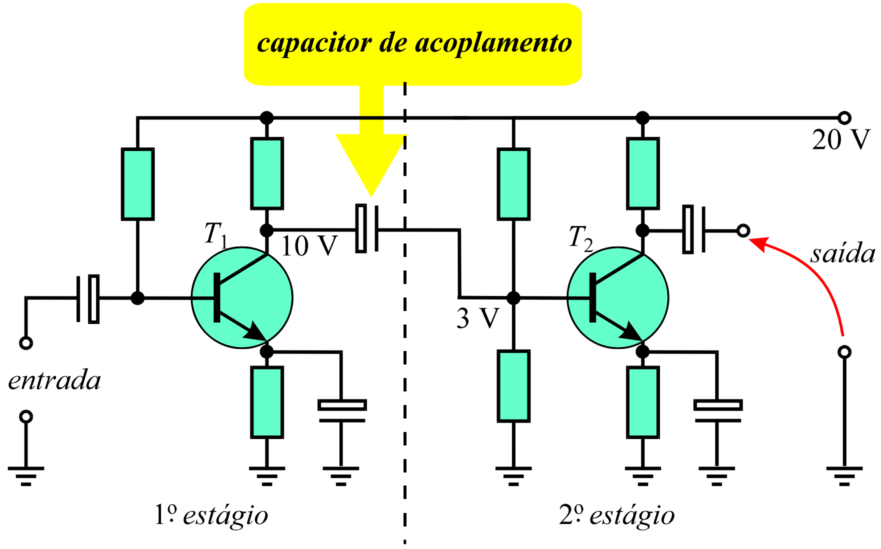


Fig.4 Acoplamento entre estágios com o emprego de um capacitor.

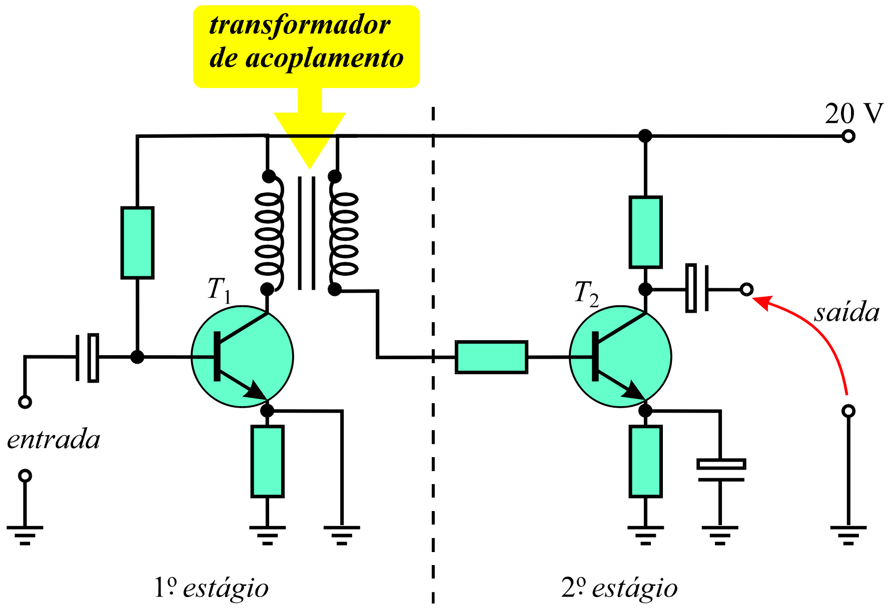


Fig.5 Acoplamento entre estágios com o emprego de um transformador.

É importante salientar que a utilização de transformadores de acoplamento implica a mudança do método de polarização do transistor T_2, mostrado na **Fig.5**, uma vez que aquele componente passa a ser polarizado por corrente de base constante. Esse fato, acrescido ao custo relativamente mais alto de transformadores, favorece o emprego mais freqüente de capacitores como

elementos de acoplamento, por serem de baixo custo e por não demandarem modificações no projeto do circuito.

A **Fig.6** ilustra a eliminação do nível *cc* do sinal na entrada do 2º estágio amplificador com o uso de um capacitor de acoplamento.

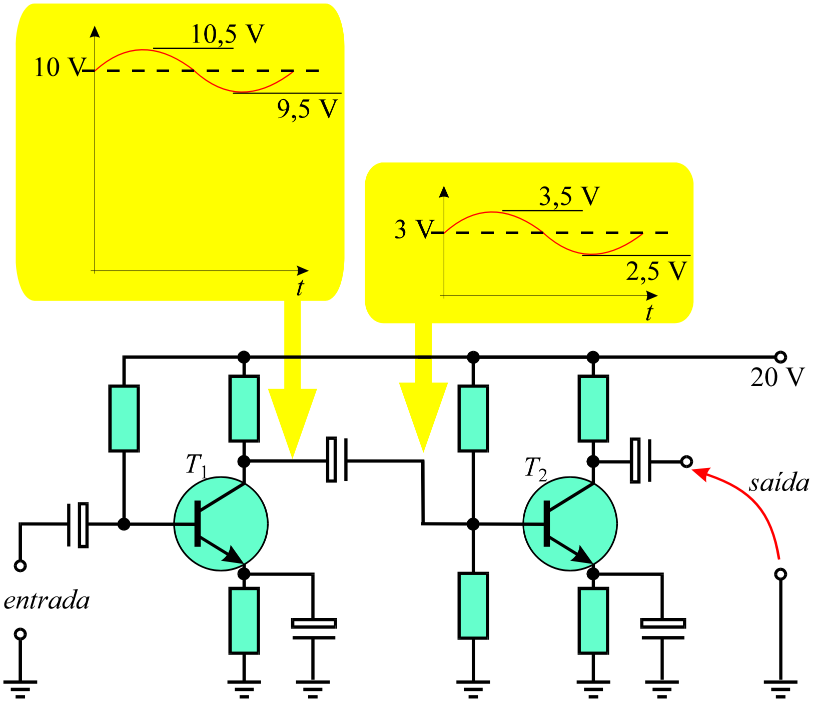


Fig.6 Eliminação do nível *cc* do sinal na entrada do segundo estágio amplificador, através de um capacitor de acoplamento.

Um aspecto importante a se considerar no acoplamento é que o capacitor ou transformador de acoplamento não são ideais. Tomando-se como exemplo o uso de um capacitor de acoplamento, como ilustrado na **Fig.7**, verifica-se que a reatância do capacitor provoca uma queda de tensão entre os seus terminais.

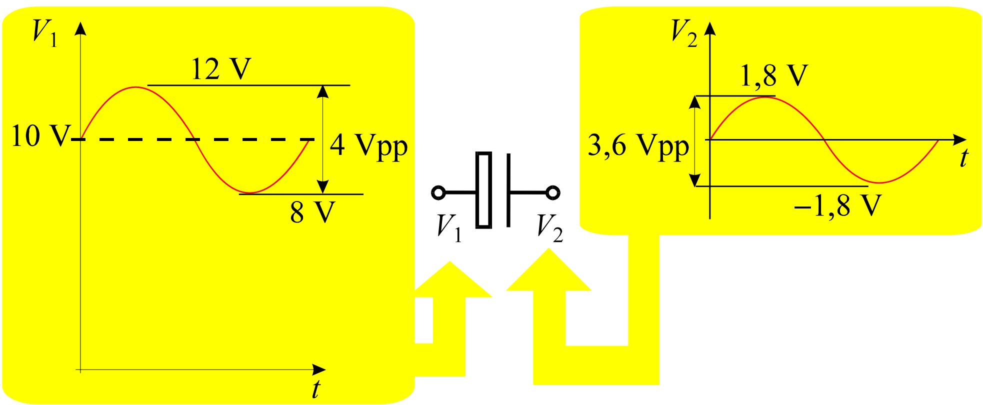


Fig.7 Eliminação do nível *cc* do sinal na entrada do 2º estágio.

Essa queda de tensão no capacitor representa uma **perda de acoplamento** e deve ser tão pequena quanto possível. Por essa razão, a capacitância do capacitor de acoplamento é dimensionada em função da menor freqüência a ser amplificada, pois é no regime de baixas freqüências que o capacitor exibe sua maior reatância, implicando maiores perdas de acoplamento.

CASAMENTO DE IMPEDÂNCIAS

Um dos aspectos mais importantes a se considerar quando se interligam estágios amplificadores em cascata é o correto casamento de impedâncias, uma vez que a máxima transferência de potência entre estágios pode ser obtida quando a impedância de saída do primeiro estágio iguala à impedância de entrada do segundo, conforme ilustrado na **Fig.8**.

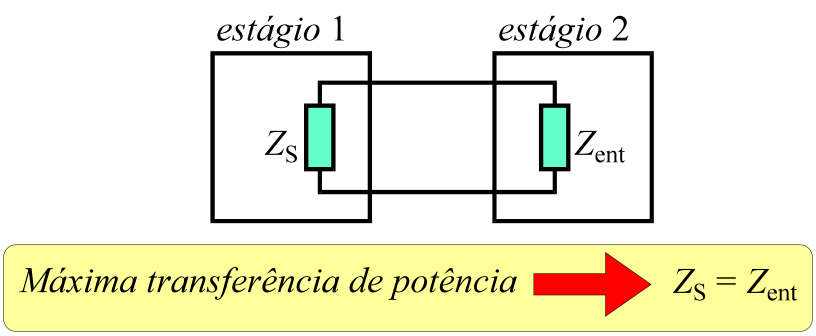


Fig.8 Estágios amplificadores com impedâncias casadas.

Como na prática pode ser difícil obter a igualdade entre impedâncias, é importante tentar dimensionar os circuitos de forma que as impedâncias envolvidas sejam aproximadamente iguais. A seguir estão descritos dois casos em que o casamento não é adequado, com as respectivas implicações.

Caso 1: $Z_s < Z_{ent}$

Nesta condição existe uma transferência adequada de tensão entre os estágios, porém a transferência de corrente é pequena.

Caso 2: $Z_s > Z_{ent}$

Nesta condição existe uma transferência adequada de corrente entre os estágios, porém a transferência de tensão é pequena.

Em ambos os casos, a potência transferida entre estágios é menor do que a potência máxima disponível no primeiro estágio.

GANHO EM DECIBEL

O Bel (B) é uma unidade utilizada para expressar a razão entre dois níveis de sinal, seja este sonoro, ou elétrico, como é o caso da tensão, corrente ou potência. Para o caso de estágios amplificadores, a razão entre os sinais de saída e de entrada de um estágio amplificador define o seu ganho, podendo ser expresso em unidades de Bel. Tendo em vista que 1B representa um ganho de 10, utiliza-se normalmente o decibel (dB) que é mais adequado para definir ganhos menores.

O ganho de potência de um estágio amplificador expresso em dB é definido pela expressão

$$G_P\,(\text{dB}) = 10\log\left(\frac{P_{\text{saida}}}{P_{\text{entrada}}}\right) \tag{3}$$

Se os sinais de entrada e saída são representados por tensões ou correntes, definem-se os ganhos de tensão e de corrente em dB pelas relações:

Ganho de tensão:

$$G_V\,(\text{dB}) = 20\log\left(\frac{V_{\text{saída}}}{V_{\text{entrada}}}\right) \tag{4}$$

Ganho de corrente:

$$G_I\,(\text{dB}) = 20\log\left(\frac{I_{\text{saída}}}{I_{\text{entrada}}}\right) \tag{5}$$

Exemplo 2: Para o estágio amplificador mostrado na **Fig.9**, determinar o ganho de tensão em dB.

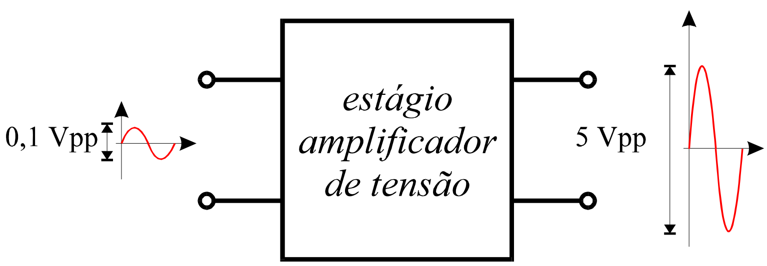


Fig.9 Estágio amplificador para o **Exemplo 2**.

Utilizando a **Eq.(4)**, tem-se que

$$G_V\,(\text{dB}) = 20\log\left(\frac{5\text{ V}}{0{,}1\text{ V}}\right) = 20\log(50) = 20 \times 1{,}7 = 34\text{ dB}$$

Existem elementos compondo estágios em que o sinal de saída é menor do que o sinal de entrada. Este é o caso, por exemplo, do filtro de freqüências ilustrado na **Fig.10**.

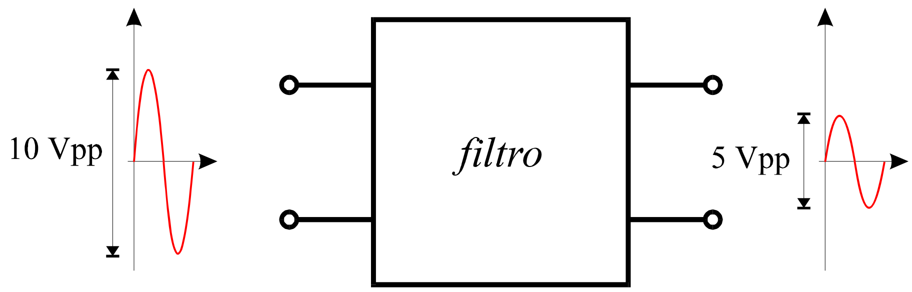


Fig.10 Um exemplo da alteração sofrida por um sinal após passagem por um filtro de freqüências.

O sinal após passagem pelo filtro sofre **atenuação**, isto é, sua amplitude decresce. A atenuação em dB é também definida por expressões semelhantes àquelas dadas pelas **Eqs.(3)**, **(4)** e **(5),** assumindo as formas:

Atenuação de potência:

$$A_P\,(\text{dB}) = 10\log\left(\frac{P_{\text{saída}}}{P_{\text{entrada}}}\right) \tag{6}$$

Atenuação de tensão:

$$A_V\,(\text{dB}) = 20\log\left(\frac{V_{\text{saída}}}{V_{\text{entrada}}}\right) \tag{7}$$

Atenuação de corrente:

$$A_I\,(\text{dB}) = 20\log\left(\frac{I_{\text{saída}}}{I_{\text{entrada}}}\right) \tag{8}$$

Como na existência de atenuação o sinal de saída é menor do que o sinal de entrada, conclui-se que esse parâmetro medido em dB será sempre negativo, como demonstrado no exemplo a seguir.

Exemplo 3: Para o filtro mostrado na **Fig.10** determinar a atenuação de tensão em dB.

Utilizando a **Eq.(7)**, tem-se que

$$A_V\,(\mathrm{dB}) = 20\log\left(\frac{5\ \mathrm{V}}{10\ \mathrm{V}}\right) = 20\log(0{,}5) = 20 \times (-0{,}3) = -6\ \mathrm{dB}$$

A **Tabela 1** apresenta valores em dB para algumas razões entre sinais de saída e de entrada.

Tabela 1 Valores em dB para algumas razões entre sinais.

$S_{saída}/S_{entrada}$	$10\log(S_{saída}/S_{entrada})$	$20\log(S_{saída}/S_{entrada})$
0,01	–20 dB	–40 dB
0,1	–10 dB	–20 dB
0,5	– 3 dB	–6 dB
1	0 dB	0 dB
2	3 dB	6 dB
5	7 dB	14 dB
10	10 dB	20 dB
20	13 dB	26 dB
100	20 dB	40 dB

OBTENÇÃO DA RAZÃO ENTRE SINAIS A PARTIR DO VALOR EM dB

As **Eqs.(3)** a **(8)** podem ser utilizadas para obter-se o ganho ou atenuação sofrida por um sinal a partir do valor correspondente em dB. Considerando por exemplo a definição geral de ganho de tensão de um sinal, dada pela **Eq.(4)**, tem-se que

$$G_V\,(\mathrm{dB}) = 20\log\left(\frac{V_{saída}}{V_{entrada}}\right)$$

ou equivalentemente

$$20\log\left(\frac{V_{\text{saída}}}{V_{\text{entrada}}}\right) = G_V\,(\text{dB}) \Rightarrow \log\left(\frac{V_{\text{saída}}}{V_{\text{entrada}}}\right) = \frac{G_V\,(\text{dB})}{20}$$

$$\frac{V_{\text{saída}}}{V_{\text{entrada}}} = 10^{\left(\frac{G_V(\text{dB})}{20}\right)} \tag{9}$$

De forma análoga obtém-se

$$\frac{I_{\text{saída}}}{I_{\text{entrada}}} = 10^{\left(\frac{G_V(\text{dB})}{20}\right)} \tag{10}$$

$$\frac{P_{\text{saída}}}{P_{\text{entrada}}} = 10^{\left(\frac{G_V(\text{dB})}{10}\right)} \tag{11}$$

<u>Exemplo 4</u>: Para o estágio amplificador da **Fig.11** determinar o sinal de saída.

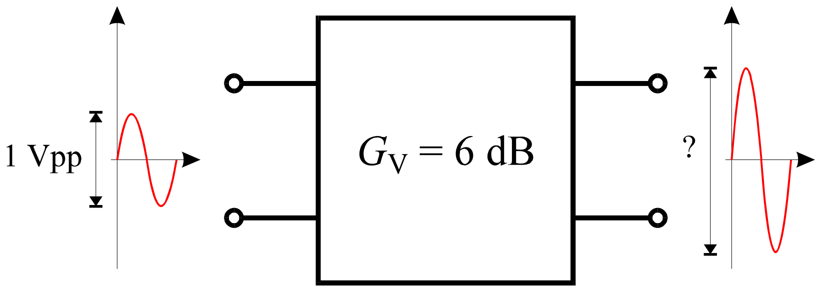


Fig.11 Estágio amplificador para o **Exemplo 4**.

Utilizando a **Eq.(9)**, tem-se que

$$\frac{V_{\text{saída}}}{V_{\text{entrada}}} = 10^{\left(\frac{G_V(\text{dB})}{20}\right)} = 10^{\left(\frac{6}{20}\right)} = 10^{0,3} = 1{,}995$$

$$\Rightarrow V_{\text{saída}} = 1{,}995 V_{\text{entrada}} = 1{,}995 \times 1 = 1{,}995 \text{ Vpp}$$

Quando se utilizam estágios em cascata, o ganho é o produto dos ganhos. Por exemplo, para dois estágios em cascata de ganhos G_1 e G_2 o ganho é dado por

$$G = G_1 G_2$$

O ganho de amplitude em dB, por exemplo, pode ser obtido das **Eqs.(4)** ou **(5)**, ou seja,

$$G(\text{dB}) = 20\log(G) = 20\log(G_1 G_2) = 20[\log(G_1) + \log(G_2)]$$

donde

$$G(\text{dB}) = 20\log G_1 + 20\log(G_2)$$

resultando em

$$G(\text{dB}) = G_1(\text{dB}) + G_2(\text{dB}) \qquad (12)$$

A **Eq.(12)** mostra que o ganho total em dB de um amplificador de dois estágios é a soma dos ganhos em dB de cada estágio. Esse resultado pode ser generalizado para um amplificador de vários estágios:

O ganho em dB de um amplificador de vários estágios pode ser obtido somando-se os ganhos em dB dos estágios individuais compondo o amplificador.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Em que ocasiões torna-se necessário utilizar estágios em cascata para amplificação de um sinal?

2. Para o amplificador de dois estágios do **Exemplo 2**, admitindo S_1 = 3,2 Vpp, determinar S_0 e S_2.

3. Qual o objetivo de se utilizarem elementos de acoplamento entre estágios amplificadores?

4. Por que é importante assegurar que a impedância de saída de um estágio amplificador seja igual à impedância de entrada do estágio seguinte?

BIBLIOGRAFIA

MALVINO, Albert Paul. Eletrônica. São Paulo, McGraw Hill, 1986. 520p. il.

MILLMAN, Jacob C. & HALKIASS, Christos C. Eletrônica; dispositivos e circuitos. São Paulo, Mc Graw-Hill do Brasil, c 1981. v.2

SENAI/DN. Reparador de circuitos eletrônicos. Rio de Janeiro, Divisão de Ensino e Treinamento, 1979. il, (Coleção Básica SENAI: Eletrônica Básica II. Módulo 2).

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Introdução

Como descrito em fascículos anteriores, o transistor convencional é um dispositivo que permite amplificar um sinal, e cujas propriedades elétricas são essencialmente controladas pela corrente injetada em um de seus terminais.

Existe uma outra classe de transistores de importância em eletrônica, denominados de **transistores de efeito de campo**, cujas propriedades elétricas são controladas pela tensão presente em um de seus terminais.

O objetivo deste fascículo é apresentar as características do transistor de efeito de campo e os princípios que governam o seu funcionamento, bem como descrever os parâmetros utilizados na caracterização dessa classe de dispositivos.

Para a boa compreensão do conteúdo e desenvolvimento das atividades contidas neste fascículo, o leitor deverá estar familiarizado com os conceitos relativos a:

- Transistor bipolar.

Transistor de efeito de campo

O transistor de efeito de campo tem capacidade de exercer o controle de corrente através da tensão aplicada em um de seus terminais, sendo utilizado, principalmente, nos estágios de entrada de instrumentos de medida, tais como osciloscópios, voltímetros eletrônicos, receptores etc., onde seja necessário uma elevada impedância de entrada.

O transistor de efeito de campo é geralmente designado pela abreviação FET cujas letras correspondem às iniciais do termo inglês *field effect transistor*. Existem duas categorias de dispositivos de efeito de campo:

- O transistor de efeito de campo de junção, designado pela sigla JFET.
- O transistor de efeito de campo de porta isolada, designado pela sigla MOSFET.

As características principais dessas duas categorias de dispositivos são examinadas a seguir.

TRANSISTOR DE EFEITO DE CAMPO DE JUNÇÃO

O JFET é constituído por um substrato de material semicondutor exibindo um tipo de dopagem, no qual é formado, por técnicas de implantação iônica, um canal de dopagem distinta daquela correspondente ao substrato, conforme ilustrado na **Fig.1**.

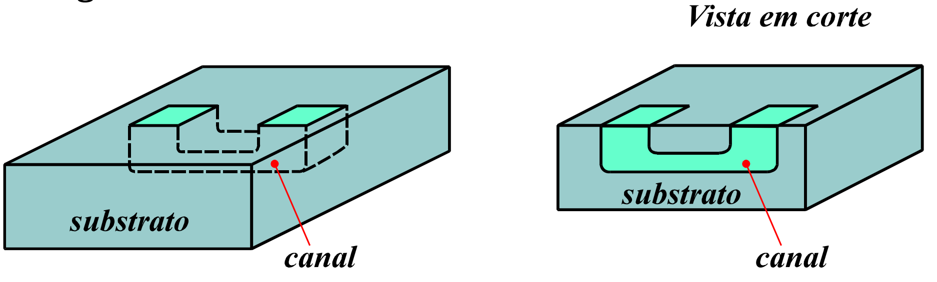


Fig.1 Estrutura básica de um JFET.

Dois tipos de dispositivos podem ser fabricados, conforme ilustrado na **Fig.2**:

- Substrato do tipo *p* e canal do tipo *n*, denominado de **JFET canal *n***.
- Substrato do tipo *n* e canal do tipo *p*, denominado de **JFET canal *p***.



Fig.2 JFETs canal *n* e canal *p*.

TERMINAIS DE LIGAÇÃO DO JFET

Os JFETs possuem 3 terminais. Dois terminais estão ligados às extremidades do canal e são denominados de **fonte** e **dreno**, como mostrado na **Fig.3**. O terminal fonte é identificado pela letra *S* (do inglês *source*) e o terminal dreno pela letra *D* (do inglês *drain*). O terceiro terminal, denominado de **porta** é identificado pela letra *G* (do inglês *gate*), sendo conectado diretamente ao substrato.

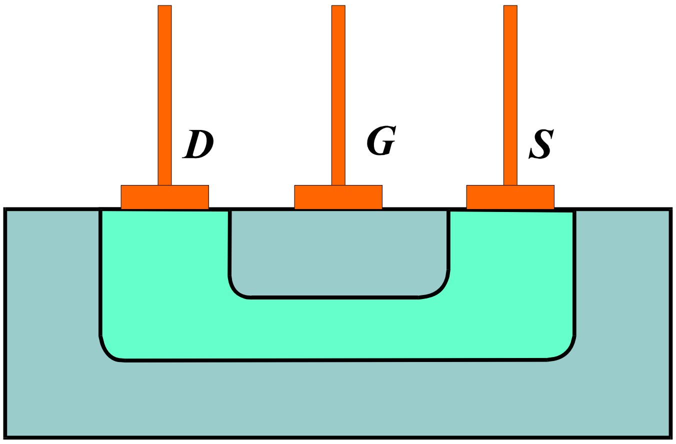


Fig.3 Terminais de um JFET.

Os terminais dreno e fonte servem a propósitos distintos e conseqüentemente não podem ser trocados um pelo outro, nas montagens envolvendo FETs.

FORMAS DE ENCAPSULAMENTO

Os transistores de efeito de campo são fabricados em invólucros semelhantes àqueles utilizados em transistores bipolares. A **Fig.4** mostra dois tipos básicos de encapsulamento disponíveis comercialmente.

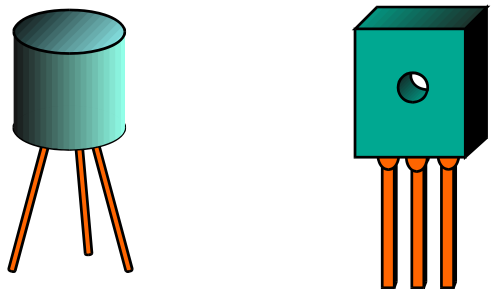


Fig.4 Aspectos típicos de encapsulamentos disponíveis comercialmente.

REPRESENTAÇÃO SIMBÓLICA

A **Fig.5** mostra a representação simbólica de JFETs canal *n* e canal *p*, onde se pode notar que a diferença nas representações, indicativa do tipo de canal do dispositivo, ocorre no sentido da seta no terminal *G*.

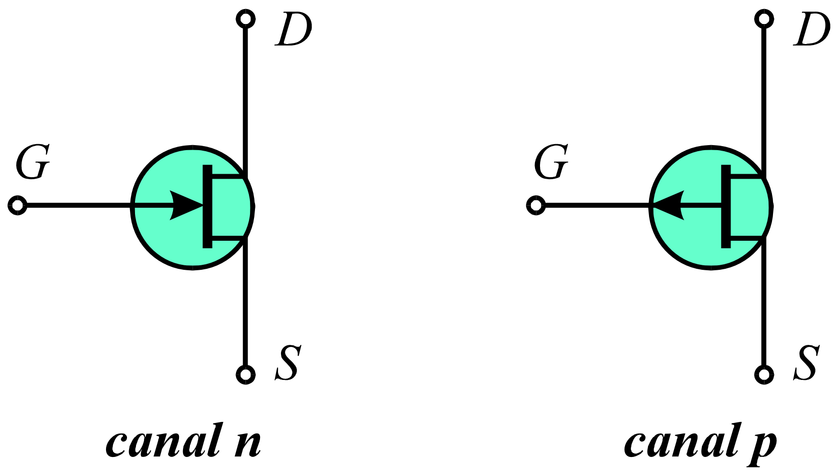


Fig.5 Representações simbólicas de JFETs canal *n* e canal *p*.

POLARIZAÇÃO DE JFETs

Como ocorre com o transistor bipolar, o JFET funciona com um terminal comum à entrada e à saída do circuito. A configuração mais usual é aquela em que o terminal fonte é escolhido como terminal comum, como mostrado na

Fig.6. Como pode ser aí observado, a forma de ligação com a fonte externa é função do tipo de canal do dispositivo.

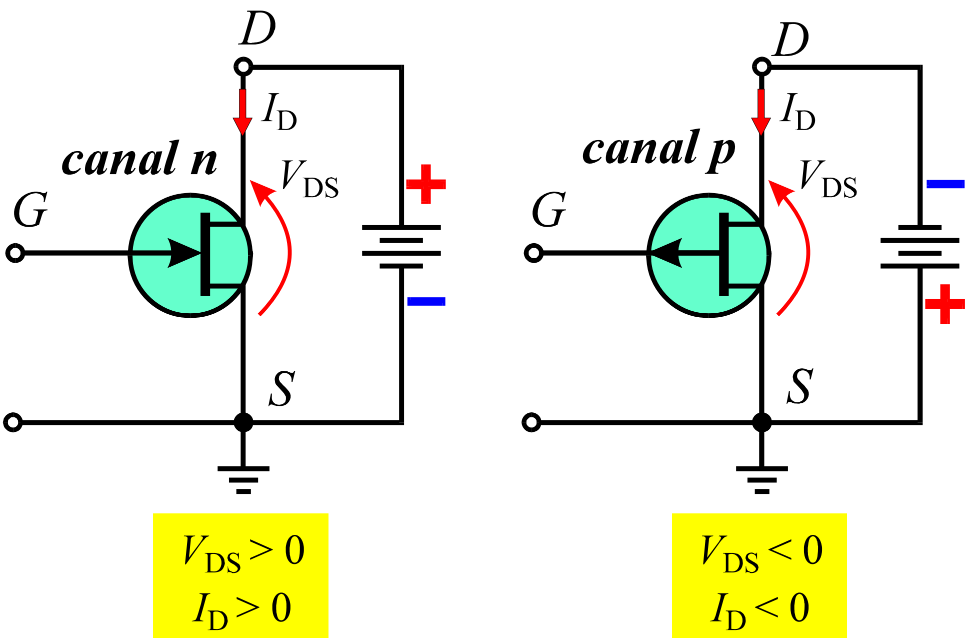


Fig.6 Formas de polarização de JFETs canal *n* e canal *p*.

A análise do comportamento do JFET em circuitos, desenvolvida nas seções seguintes, utiliza o JFET canal *p* como modelo. Com a devida troca de polaridade das fontes de alimentação no circuito, os resultados da análise são também aplicáveis para o caso do JFET canal *n*.

Fonte

Em condições normais de operação, o terminal fonte do *p*-JFET é ligado ao pólo positivo da fonte de alimentação, como mostrado na **Fig.7**.

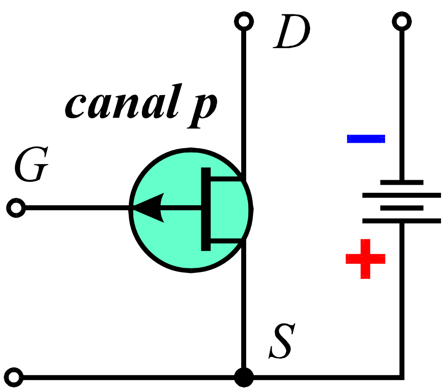


Fig.7 Ligação do terminal *S* de um JFET à fonte de alimentação.

O terminal fonte funciona como terminal de referência para o FET assim como o emissor funciona como terminal de referência para o transistor bipolar.

Dreno

O terminal dreno é ligado ao pólo negativo da fonte de alimentação através de um resistor de dreno R_D, como mostrado na **Fig.8**.

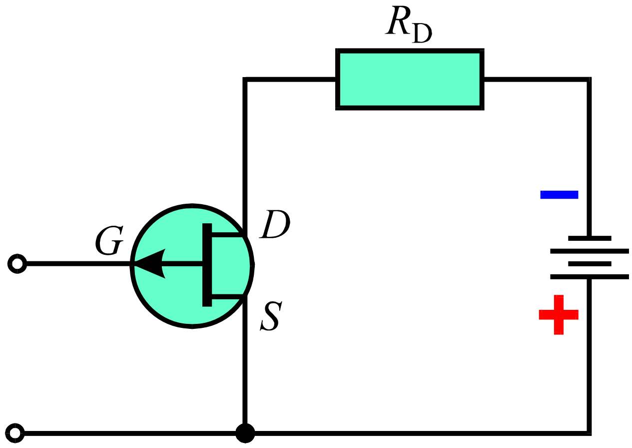


Fig.8 Ligação do terminal *D* de um JFET à fonte de alimentação, por intermédio de um resistor.

O resistor de dreno desempenha uma função semelhante àquela referente ao resistor de coletor em circuitos com transistores bipolares.

Porta

A porta é o terminal de controle de um FET, desempenhando um papel semelhante ao terminal de base de um transistor bipolar. Existe uma diferença fundamental no entanto, nas condições de operação de um FET com respeito ao princípio de funcionamento do transistor bipolar:

Em operação normal, a junção pn formada entre porta e fonte de um FET deve estar inversamente polarizada.

Para obter a condição normal de operação, uma fonte externa deve ser utilizada para polarizar inversamente a junção formada entre porta e fonte, como mostrado na **Fig.9**.

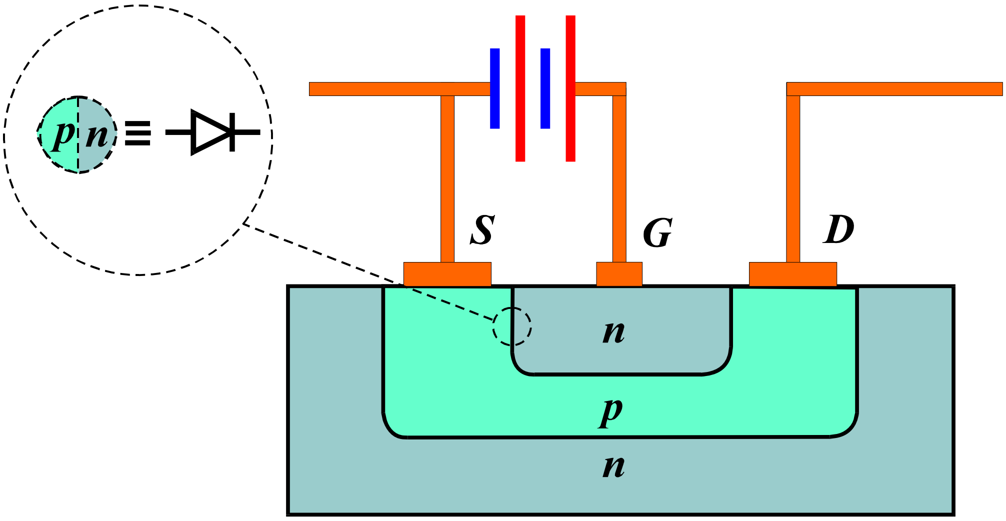


Fig.9 Emprego de uma fonte externa para polarizar inversamente a junção formada entre a porta e a fonte de um FET.

Dessa forma, no *p*-JFET o terminal da porta fica mantido a um potencial positivo com relação ao terminal fonte, e a configuração do dispositivo no circuito assume a forma mostrada na **Fig.10**. Essa condição de polarização inversa atribui ao FET uma altíssima impedância de entrada, que pode chegar a algumas dezenas de megaohms.

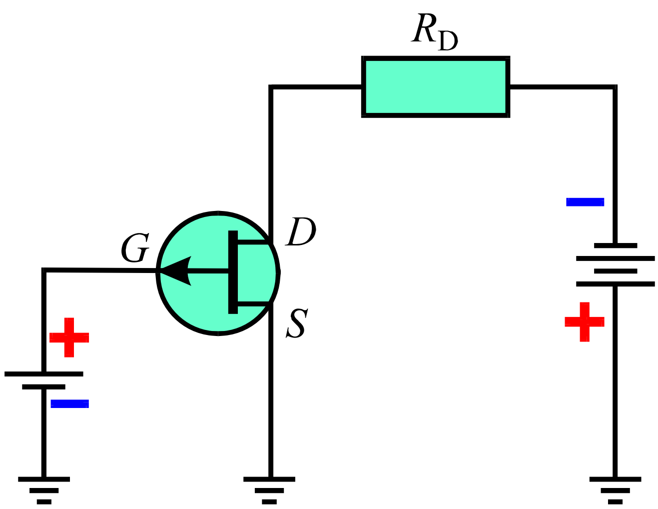


Fig.10 Condições normais de polarização de um *p*-JFET.

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O estudo do princípio de funcionamento do FET é feito com base em uma análise de parâmetros elétricos do componente, cujas relações podem ser representadas em termos de curvas características. Os parâmetros utilizados na

representação das curvas características estão representados na **Fig.11**, e recebem as seguintes denominações:

I_D = corrente que flui para o terminal dreno, também denominada de corrente de dreno.
$V_{DS} \equiv V_D - V_S$ = tensão entre dreno e fonte.
$V_{GS} \equiv V_G - V_S$ = tensão de controle entre porta e fonte.

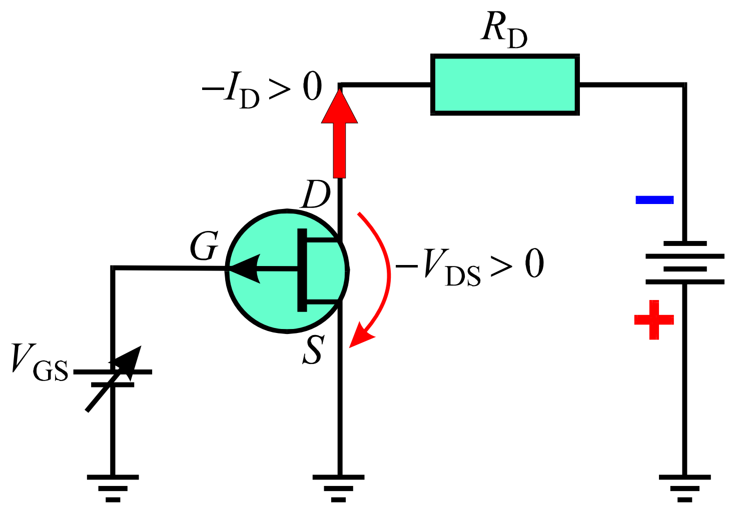


Fig.11 Parâmetros elétricos associados ao FET.

O FET é um transistor cujo princípio de funcionamento baseia-se no controle que a tensão V_{GS} exerce sobre a corrente I_D. Esse controle é semelhante ao tipo de controle de fluxo de fluido em um sistema hidráulico, do tipo ilustrado na **Fig.12.**

Como mostrado na **Fig.12,** o sistema hidráulico é composto de um duto e de um pistão com a finalidade de controlar o fluxo de fluido através do canal.

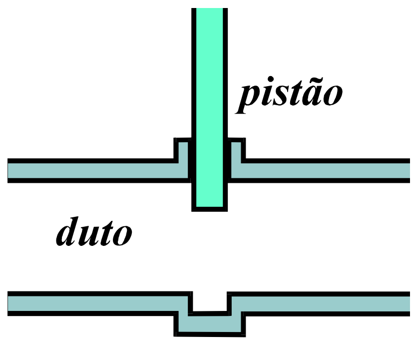


Fig.12 Sistema hidráulico com controle de fluxo de fluido.

O fluxo máximo de fluido ocorre quando o pistão de controle é deslocado totalmente para cima, proporcionando a abertura total do canal, como mostrado na **Fig.13**. Como pode ser aí observado, a medida que o canal vai sendo obstruído pela penetração do pistão, o fluxo de fluido diminui até o ponto de se tornar totalmente bloqueado quando o pistão é totalmente inserido no canal.

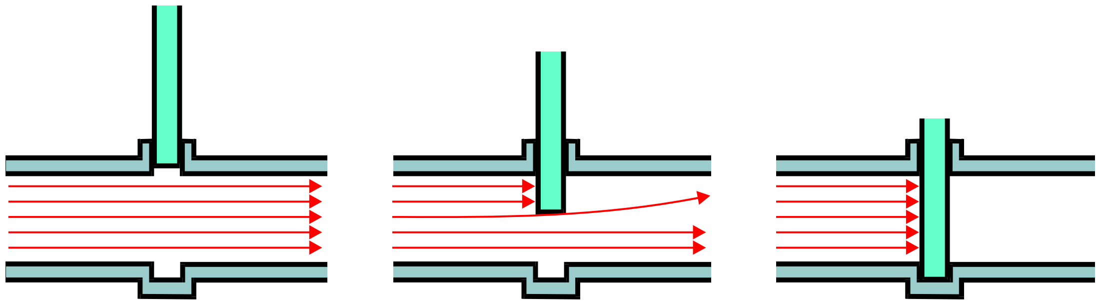


Fig.13 Fluxo de fluido para diferentes penetrações do pistão no canal.

Da mesma forma que o pistão atua sobre o fluxo de fluido, abrindo ou fechando fisicamente o canal, a tensão de controle V_{GS} efetua um controle eletrostático do fluxo de corrente através do canal do FET. Esse tipo de controle pode ser analisado a partir de três condições de operação:

- Com o terminal porta aberto.
- Com o potencial da porta nulo em relação ao terminal fonte.
- Com o potencial da porta positivo em relação ao terminal fonte.

Para maior clareza na análise dessas três situações, o FET será representado de acordo com a estrutura simplificada mostrada na **Fig.14**, que elimina os detalhes referentes à geometria do canal no interior do dispositivo.

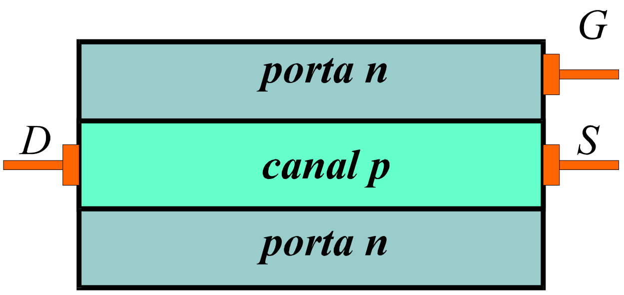


Fig.14 Representação simplificada da estrutura de um FET.

Porta em aberto

Notando que em um *p*-JFET a corrente no canal é constituída unicamente de lacunas, e considerando que a corrente flui no sentido fonte-dreno, com o terminal de controle desligado, o canal fica totalmente aberto e a corrente entre fonte e dreno varia aproximadamente em proporção direta com a variação da tensão entre os terminais dreno e fonte, como mostrado na **Fig.15**.

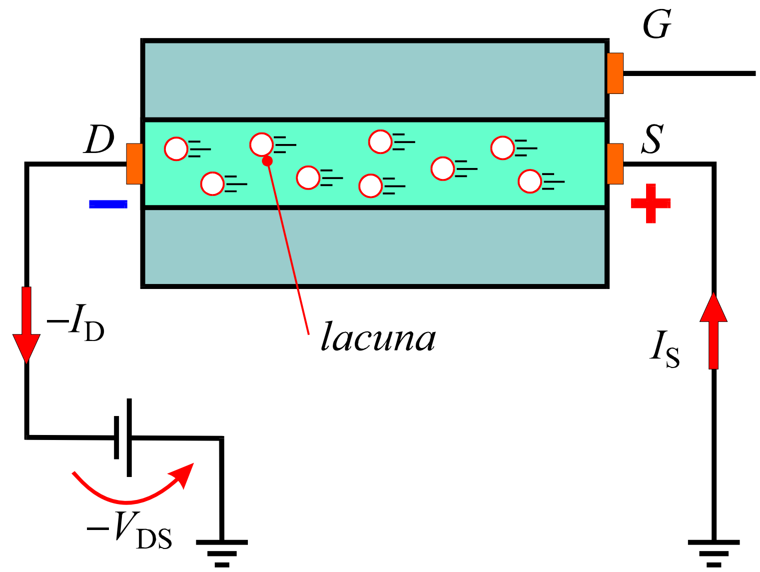


Fig.15 Corrente no canal de um *p*-JFET com a porta desligada.

Observa-se que nessas condições, o comportamento do canal é semelhante ao de um resistor, com o aumento da tensão aplicada se traduzindo em um aumento proporcional no fluxo de corrente, conforme mostrado na **Fig.16**.

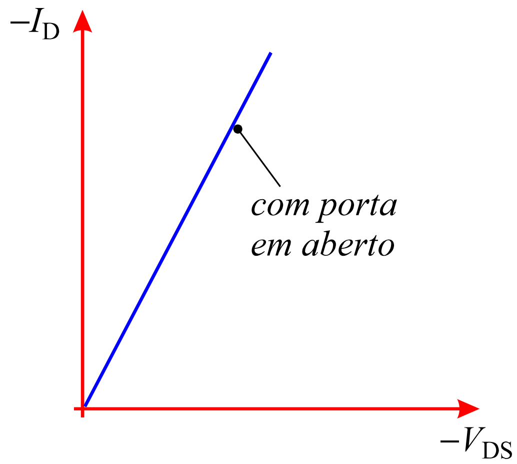


Fig.16 Representação gráfica da relação $I_D \times V_{DS}$ para um *p*-JFET com porta desligada.

Com a porta desligada, o canal de um JFET se comporta como um resistor e a corrente no canal varia em proporção direta com a tensão aplicada entre seus terminais.

Um aspecto importante a se considerar nesse caso é que, uma vez que o canal se comporta como uma resistor, o potencial entre dreno e fonte se distribui ao longo do canal como em um divisor de tensão.

Essa distribuição está ilustrada na **Fig.17** para o caso $V_{DS} = -2$ V. Como pode ser aí observado, o potencial ao longo do canal diminui gradualmente a partir do terminal fonte, de acordo com uma função linear $V(x)$, onde x representa a posição ao longo do canal, medida a partir do terminal dreno.

Apesar de o FET não ser utilizado na prática com o terminal porta em aberto, é muito importante conhecer a distribuição do potencial ao longo do canal para compreender o princípio de funcionamento do dispositivo.

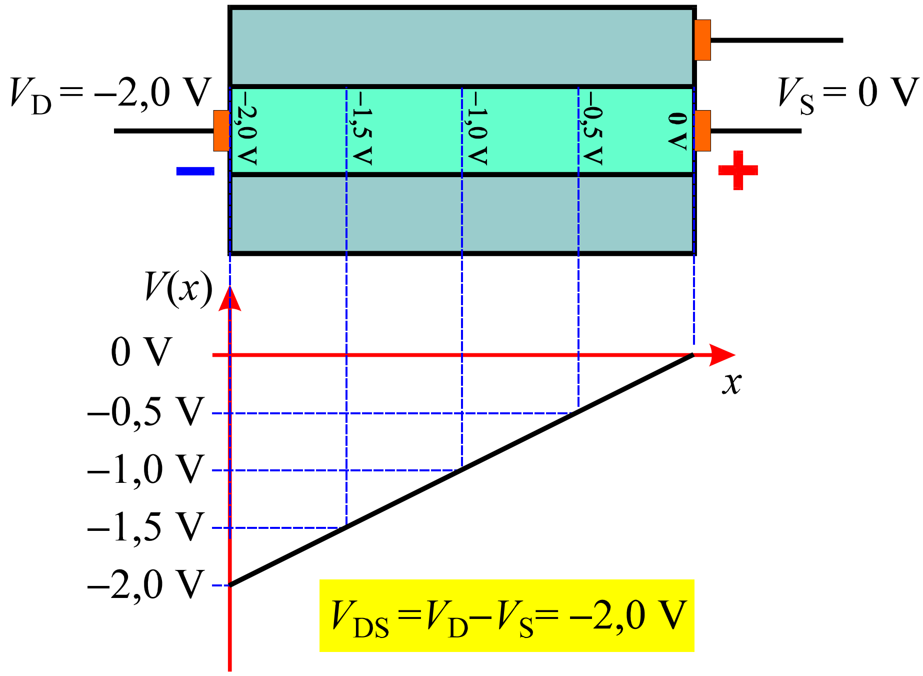


Fig.17 Exemplo típico ilustrando a distribuição de potencial ao longo do canal de um *p*-JFET.

Porta aterrada

Quando o terminal porta é conectado ao terminal fonte, a diferença de potencial entre a porta e a fonte é nula, ou seja, $V_{GS} = 0$. Como a porta está a um potencial nulo, o potencial negativo distribuído ao longo do canal coloca em bloqueio todos os pontos das duas junções formadas entre o substrato e o canal do dispositivo, conforme ilustrado na **Fig.18**.

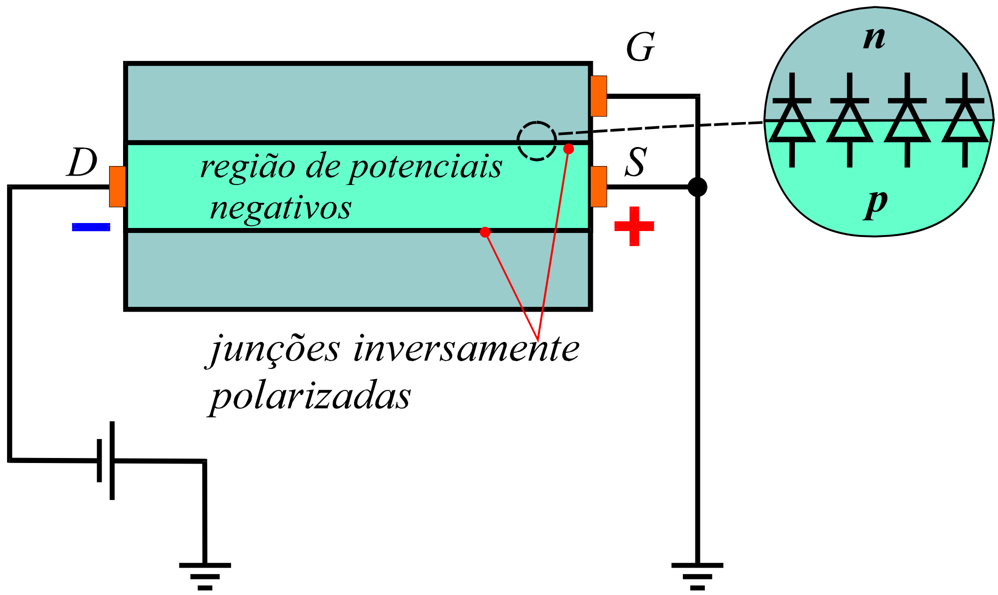


Fig.18 Dispositivo *p*-JFET com porta aterrada.

O potencial negativo no interior do canal provoca um acúmulo de cargas descobertas positivas no substrato, nas proximidades das duas junções formadas com o canal. Como ilustrado na **Fig.19**, o acúmulo de cargas descobertas é maior na região mais próxima ao terminal dreno devido ao potencial no interior do canal ser mais negativo nas proximidades daquela região.

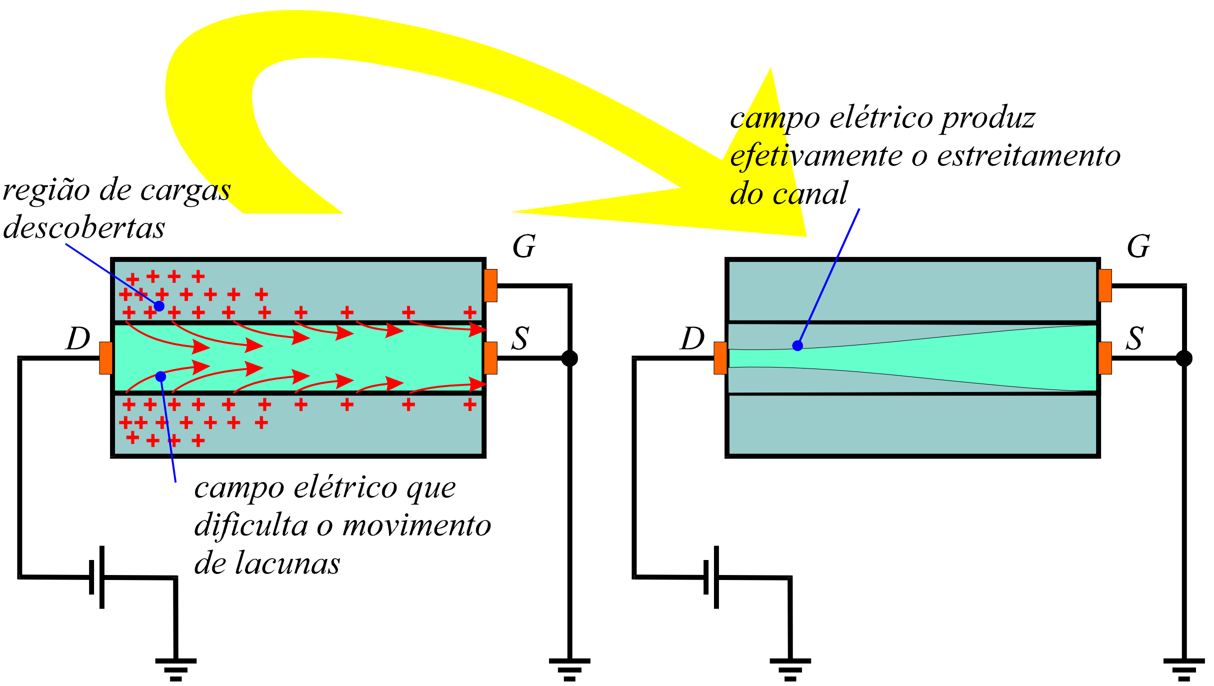


Fig.19 Distribuição de cargas descobertas no substrato de um *p*-JFET com porta aterrada.

Como ilustrado na **Fig.19**, o acúmulo de cargas positivas nas duas junções canal-substrato gera um campo elétrico que se projeta para dentro do canal, dificultando o fluxo de lacunas em seu interior, efetivamente reduzindo a área útil para o fluxo daqueles portadores. Esse processo ocorre de forma semelhante à atuação do pistão, no sistema hidráulico descrito anteriormente.

As regiões de depleção formadas nas duas junções entre o canal e o substrato penetram cada vez mais no interior do canal, à medida que o potencial no terminal dreno se torna mais negativo. Se por um lado o potencial mais negativo naquele terminal favorece o aumento da corrente de lacunas no interior do canal, por outro lado, o alargamento das duas regiões de depleção dificultam o fluxo de corrente. Como resultado, a partir de um certo valor da tensão negativa V_{DS} entre dreno e fonte, a corrente no canal satura em um valor limite I_{Dsat}.

Dessa forma, a relação entre os parâmetros V_{DS} e I_D assume a forma mostrada no gráfico da **Fig.20**, quando a porta está aterrada.

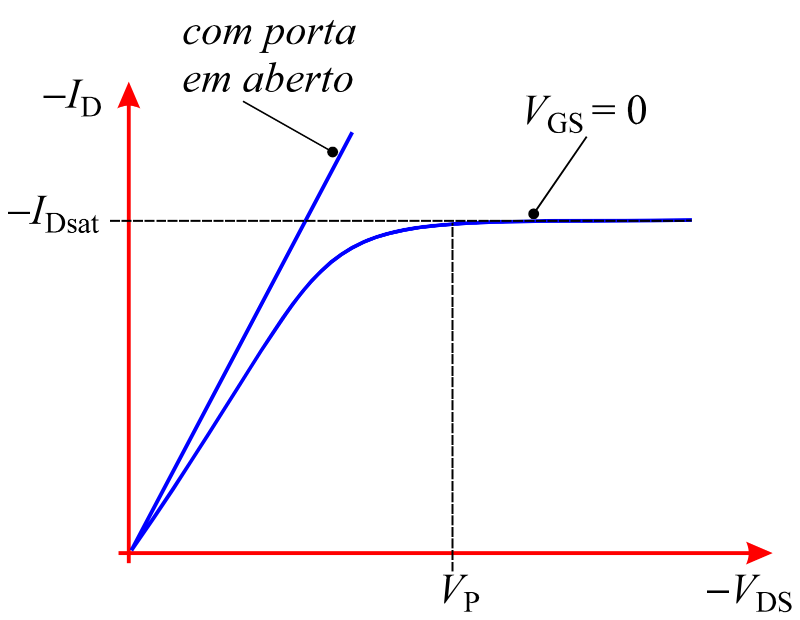


Fig.20 Representação gráfica da relação $I_D \times V_{DS}$ para um *p*-JFET com porta aterrada.

O gráfico da **Fig.20** mostra que a partir de um certo valor do parâmetro V_{DS} a corrente I_D permanece praticamente constante. O valor de tensão em que ocorre a saturação da corrente é denominado de **tensão de pinçamento V_P** (do termo inglês *pinch-off*) e o valor da corrente de saturação é denominada de **corrente de saturação de dreno** I_{Dsat}.

Potencial de porta positivo

Aplicando-se uma tensão positiva entre porta e fonte, o efeito da tensão inversa externa soma-se ao efeito de polarização interna, aumentando o acúmulo de cargas positivas nas duas junções entre o substrato e o canal. Esse efeito equivale a alterar a largura efetiva do canal, conforme ilustrado na **Fig.21**.

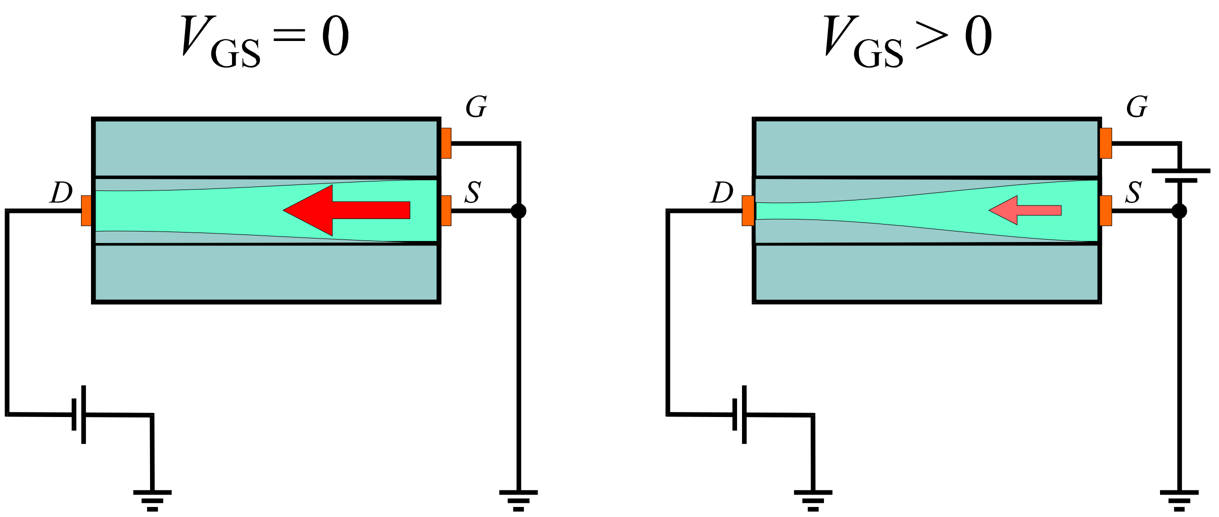


Fig.21 Larguras efetivas do canal de um *p*-JFET para os casos $V_{GS} = 0$ e $V_{GS} > 0$.

Como o fluxo de corrente depende da abertura no canal, conclui-se que:

V_{GS} ↑ ⇒ largura do canal ↓ ⇒ I_D ↓

V_{GS} ↓ ⇒ largura do canal ↑ ⇒ I_D ↑

Pode-se sumarizar o comportamento elétrico de um FET de acordo com a seguinte afirmativa:

A corrente I_D entre fonte e dreno de um FET é controlada pela tensão V_{GS} aplicada entre porta e fonte.

Utilizando-se valores distintos da tensão V_{GS}, obtém-se uma família de curvas representativas das relações entre I_D e V_{DS}, como mostrado na **Fig.22**. Essa família de curvas características é denominada de **característica de dreno do JFET**.

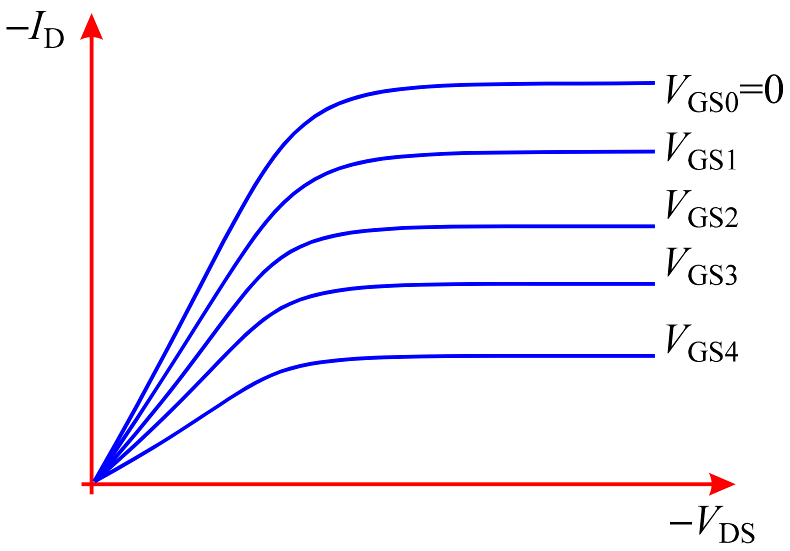


Fig.22 Gráfico representativo da característica de dreno de um *p*-JFET.

Um aspecto importante a ser observado no uso do JFET é que o potencial do terminal porta **sempre coloca a junção porta-fonte em bloqueio.** Se essa junção for polarizada em condução o transistor pode ser danificado.

O diagrama a seguir mostra como deve ser aplicada a tensão entre os terminais porta e fonte, para operação adequada do JFET.

***p*-JFET** $\Rightarrow$ $V_{GS} > 0$

***n*-JFET** $\Rightarrow$ $V_{GS} < 0$

PARÂMETROS BÁSICOS DE UM JFET

Tensão de pinçamento

A tensão de pinçamento V_P representa o valor de tensão dreno-fonte a partir do qual ocorre saturação da corrente de dreno. Existe um determinado

valor V_P para cada valor da tensão porta-fonte V_{GS}, conforme ilustrado na **Fig.23**.

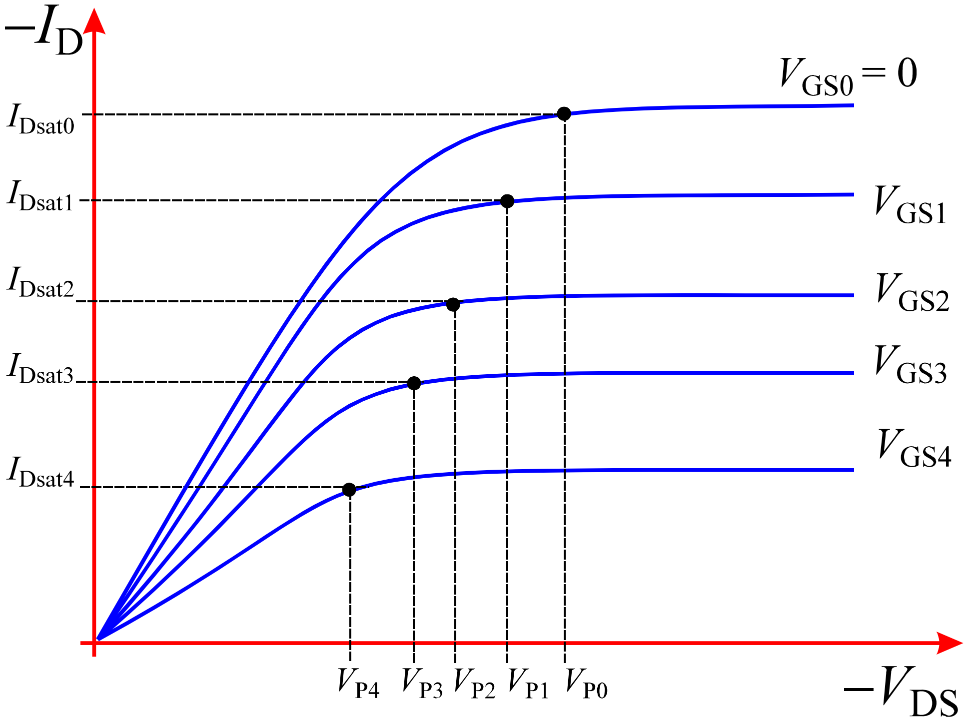


Fig.23 Tensões de pinçamento nas curvas características de um *p*-JFET.

Unindo-se os valores de corrente e tensão obtidos nos pontos de pinçamento das diferentes curvas características do JFET, obtém-se uma curva de pinçamento ou curva de *pinch-off*, como mostrado na **Fig.24**.

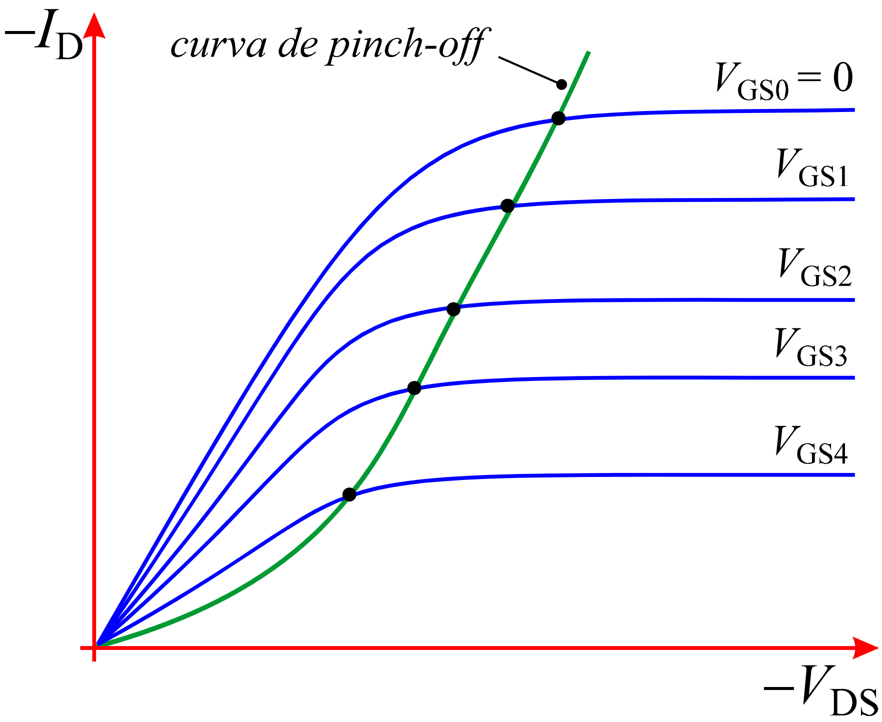


Fig.24 Curva de *pinch-off* típica de um *p*-JFET.

Tensão de porta no corte

A tensão de porta no corte, representada pelo parâmetro $V_{GS,off}$ corresponde ao valor de tensão V_{GS} que provoca o fechamento completo do canal do JFET, bloqueando portanto o fluxo da corrente I_D. Essa condição está representada no gráfico da **Fig.25**.

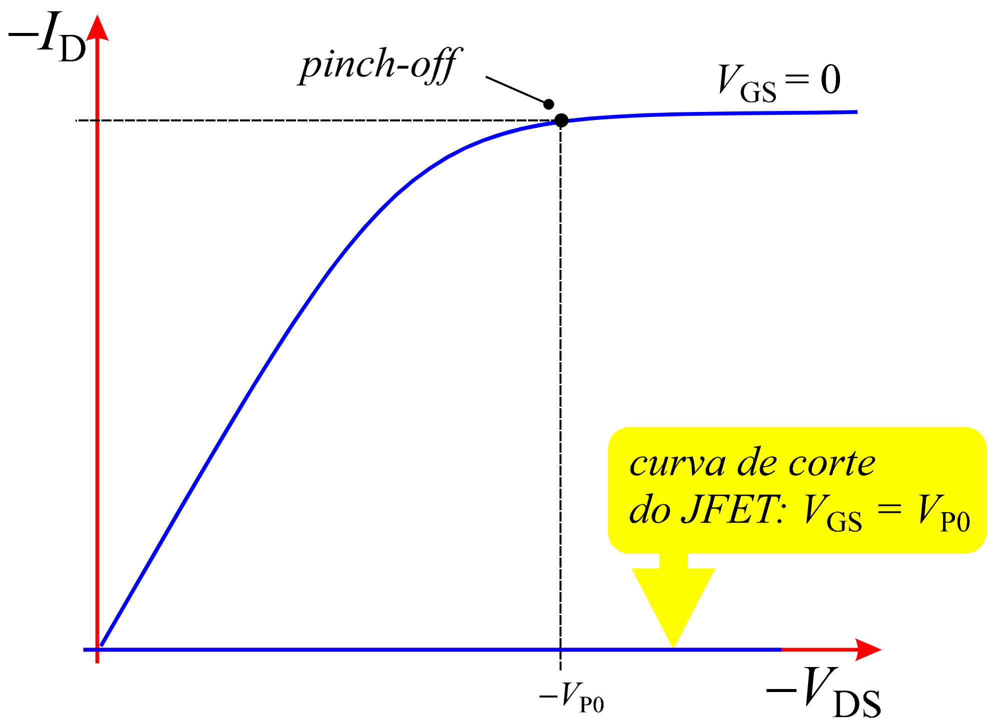


Fig.25 Curva de corte de um JFET.

Na condição de corte pode circular no canal uma corrente de alguns microampères, e na maioria dos casos o parâmetro $V_{GS,off}$ é aproximadamente igual à tensão de pinçamento V_{P0}, ou seja,

<u>Condição de corte do JFET</u> $\Rightarrow$ $V_{GS,off} \approx V_{P0}$

Resistência de condução do canal

A resistência de condução do canal $R_{DS,on}$ é aquela apresentada pelo canal na faixa de valores do parâmetro V_{DS} satisfazendo à condição

$$|V_{DS}| < V_P$$

Nessas condições o canal se comporta como um resistor convencional, com a corrente I_D variando de uma forma aproximadamente linear com a tensão V_{DS}. O parâmetro $R_{DS,on}$, é dependente do valor da tensão V_{GS}, situando-se tipicamente na faixa de 20 ohms a algumas centenas de ohms.

Tensão de ruptura

A tensão de ruptura de um JFET corresponde ao valor de tensão V_{DS} a partir do qual a corrente no canal entra no regime de ruptura por avalanche. Folhetos de especificações do fabricante fornecem os valores máximos admissíveis da tensão V_{DS} de forma a evitar a ocorrência de ruptura no dispositivo.

REGIÕES DE OPERAÇÃO DE UM JFET

O diagrama contendo as curvas características de um JFET pode ser dividido em três regiões, conforme mostrado na **Fig.26**, e descritas a seguir.

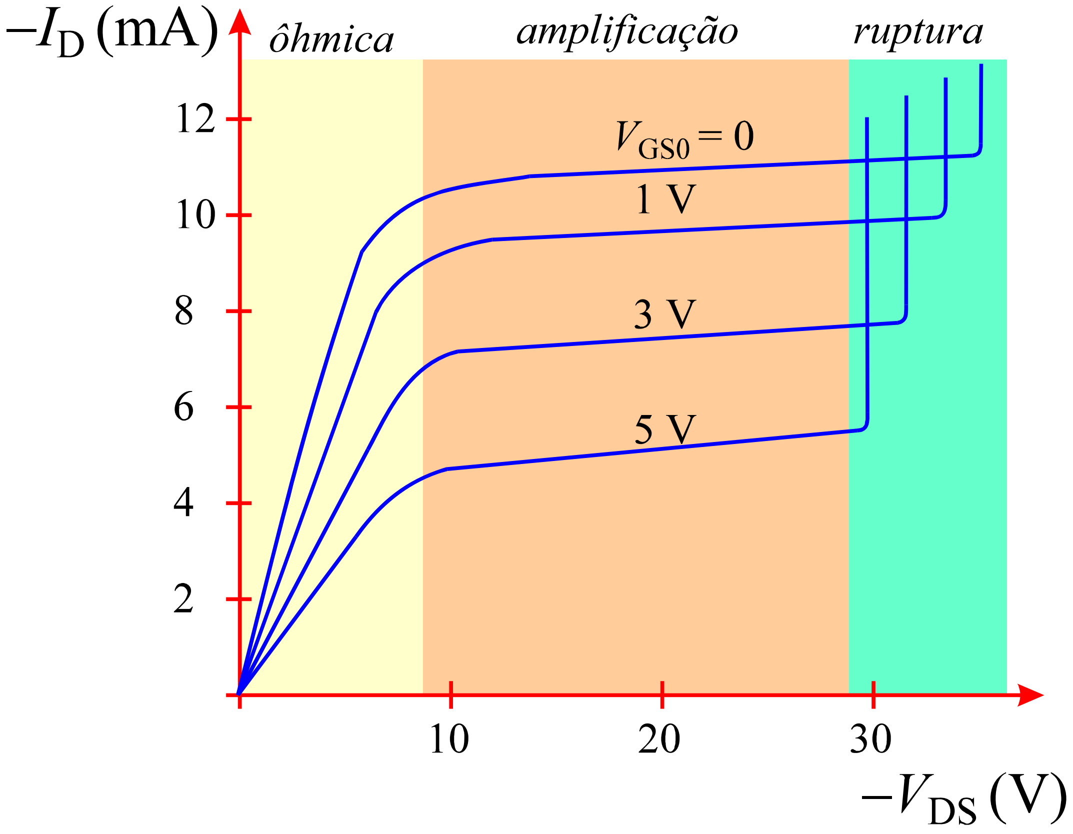


Fig.26 Regiões de operação no diagrama das curvas características de um JFET.

Região ôhmica

A região ôhmica mostrada na **Fig.26** ocorre na faixa de valores V_{DS} satisfazendo à condição

$$|V_{DS}| < V_P$$

onde o transistor se comporta como um resistor, cujo valor de resistência $R_{DS,on}$ é determinado pela tensão entre porta e fonte V_{GS}.

Como se pode observar na **Fig.27**, na região ôhmica o parâmetro $R_{DS,on}$, obtido da relação

$$R_{DS,on} = \frac{V_{DS}}{I_{DS}}$$

aumenta com a tensão V_{GS}.

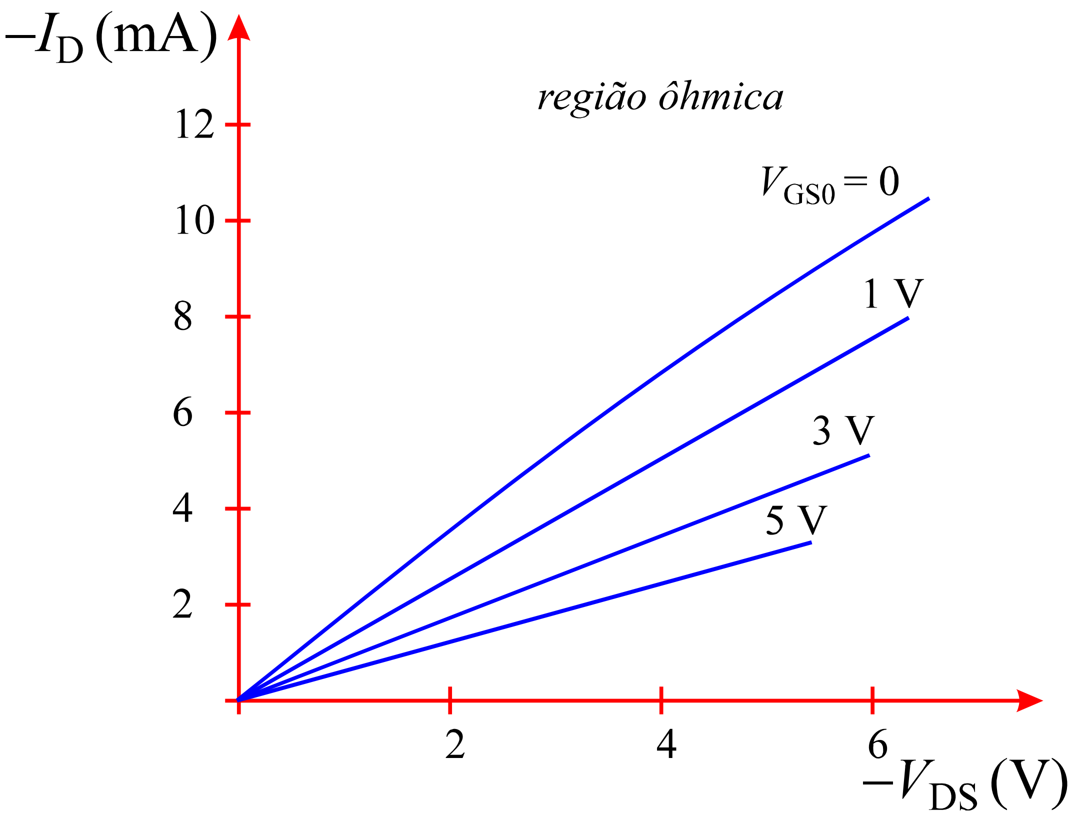


Fig.27 Região ôhmica no diagrama das curvas características de um JFET, expandido horizontalmente.

Região de amplificação

A região de amplificação de um JFET, mostrada na **Fig.26**, é aquela em que a corrente no canal se torna independente da tensão V_{DS} com o seu valor controlado pela tensão V_{GS} entre os terminais da porta e da fonte. Nesse regime de operação, o JFET comporta-se praticamente como uma fonte de corrente tendo uma resistência da ordem de algumas centenas de quiloohms.

Região de ruptura

A região de ruptura, ilustrada na **Fig.26**, está situada na faixa de valores mais altos da tensão V_{DS}, suficientes para provocar o fenômeno de ruptura por avalanche no canal. Operação do JFET nessa região deve sempre ser evitada, sob pena de causar danos irreparáveis ao dispositivo.

TRANSISTOR DE EFEITO DE CAMPO DE PORTA ISOLADA - MOSFET

Os transistores de efeito de campo do tipo porta isolada (IGFET - *Isolated Gate Field Effect Transistor*), assim como os JFETs, são dispositivos unipolares cujo controle de corrente é realizado por intermédio de um campo eletrostático. A sigla MOSFET advinda do termo inglês *Metal-Oxide-Semiconductor, Field Effect Transistor*, é adotada como padrão de referência aos transistores de efeito de campo de porta isolada.

A **Fig.28** ilustra as diferenças estruturais entre dispositivos MOSFET e JFET.

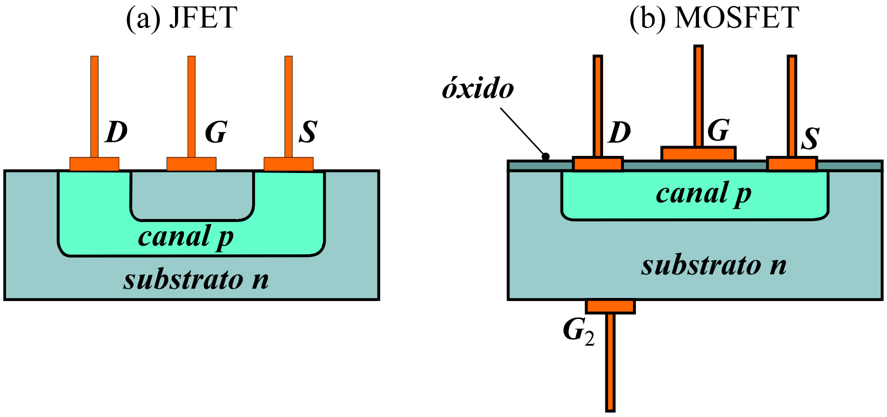


Fig.28 Estruturas básicas dos dispositivos JFET e MOSFET.

Como mostrado na **Fig.28a**, em dispositivos JFET o canal está localizado inteiramente no interior do substrato, existindo portanto duas junções semicondutoras entre o substrato e o canal. Em dispositivos MOSFET, por outro lado, o eletrodo metálico do terminal porta é separado do canal por uma fina camada isolante de óxido, conforme mostrado na **Fig.28b**. Forma-se portanto uma estrutura entre porta e canal do tipo metal-óxido-semicondutor (MOS).

A presença da camada isolante entre porta e canal do dispositivo MOSFET permite atingir níveis de impedância de entrada extremamente altos (da ordem de $10^{15}\,\Omega$).

Existem dois tipos de dispositivos MOSFET: depleção e enriquecimento. Cada tipo tem características próprias, como descrito a seguir.

MOSFET TIPO DEPLEÇÃO

O canal de um dispositivo MOSFET depleção exibe dopagem distinta do substrato. Um eletrodo metálico isolado do canal forma o terminal porta. A **Fig.29** mostra o aspecto estrutural dos MOSFETs depleção canal *p* e canal *n*.

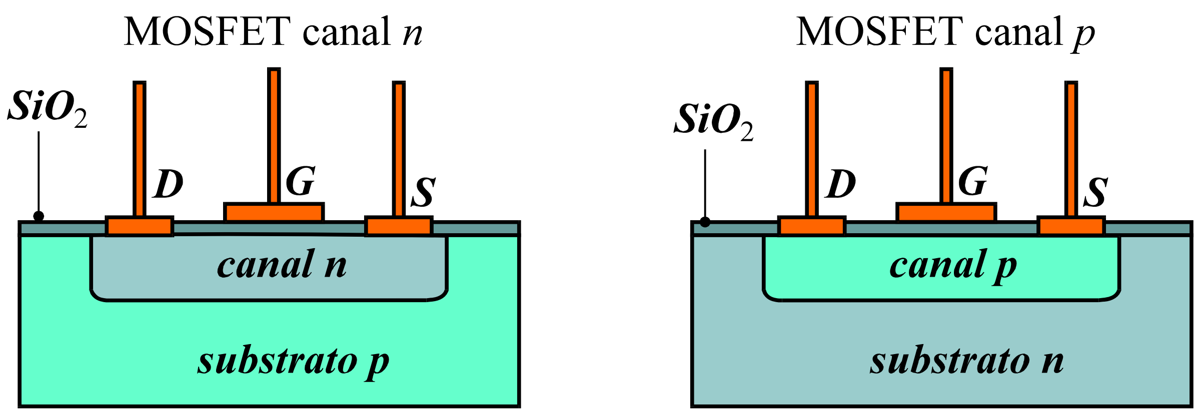


Fig.29 Estruturas MOSFET tipo depleção de canal *p* e de canal *n*.

O controle de corrente em MOSFETs depleção, da mesma forma que em dispositivos JFET, é feito pelo controle da extensão da região de depleção no interior do canal através do potencial aplicado à porta do dispositivo.

As representações de circuito de MOSFETs depleção estão ilustradas na **Fig.30**. Como pode ser aí observado, essas representações diferem apenas nos sentidos da seta no terminal fonte. Vale notar que o isolamento entre porta e canal está também representado em ambos os símbolos mostrados na **Fig.30**.

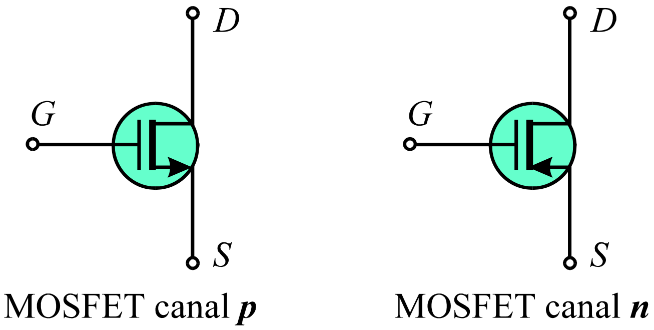


Fig.30 Representações de circuito de MOSFETs depleção.

Princípio de funcionamento

O princípio de funcionamento do MOSFET depleção é quase que semelhante ao do JFET e será analisado inicialmente para o caso de um dispositivo com canal *p*.

Como ilustrado na **Fig.31a**, quando o terminal porta fica submetido ao mesmo potencial do terminal fonte, os portadores movem-se livremente no canal, propiciando o aparecimento de uma corrente entre fonte e dreno.

A aplicação de uma tensão positiva à porta do dispositivo provoca o aparecimento de uma região de depleção que estreita a faixa de passagem de portadores através do canal, como mostrado na **Fig.31b**, reduzindo assim a corrente I_D.

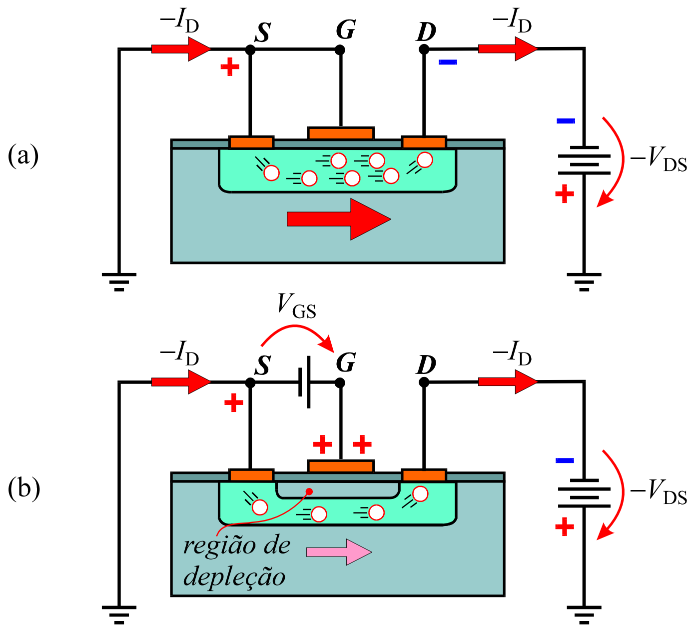


Fig.31 Funcionamento do MOSFET depleção, canal *p*:**(a)** com porta aterrada, **(b)** com potencial positivo aplicado à porta.

Dessa forma, através do controle do potencial aplicado à porta, pode-se controlar a corrente no canal.

Há contudo uma diferença singular entre MOSFETS depleção e JFETs. No caso de dispositivos JFET, a junção *pn* formada entre canal e substrato não pode ser polarizada diretamente, para evitar o surgimento de uma corrente de fuga excessiva através do terminal porta trazendo como conseqüência uma queda acentuada na impedância de entrada.

Em MOSFETs depleção essa situação não ocorre pois o terminal porta é isolado do canal, independentemente da polaridade dos terminais. Dessa forma, em MOSFETs depleção tipo *p* a aplicação de um potencial negativo à porta provoca um aumento na corrente I_D, uma vez que nessa situação a região de depleção no interior do canal é diminuída substancialmente, conforme ilustrado na **Fig.32**.

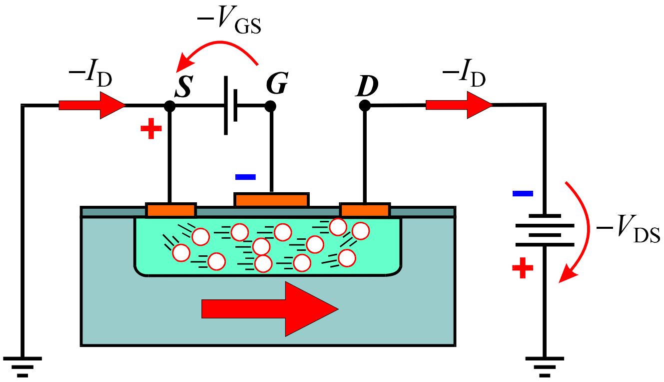


Fig.32 Funcionamento do MOSFET tipo depleção, canal *p*, com potencial negativo aplicado à porta.

A **Fig.33** mostra as curvas características de saída do MOSFET tipo depleção, canal *p*.

Um exame dos parâmetros referentes a cada curva indica que a porta pode ficar submetida tanto a potenciais positivos como negativos.

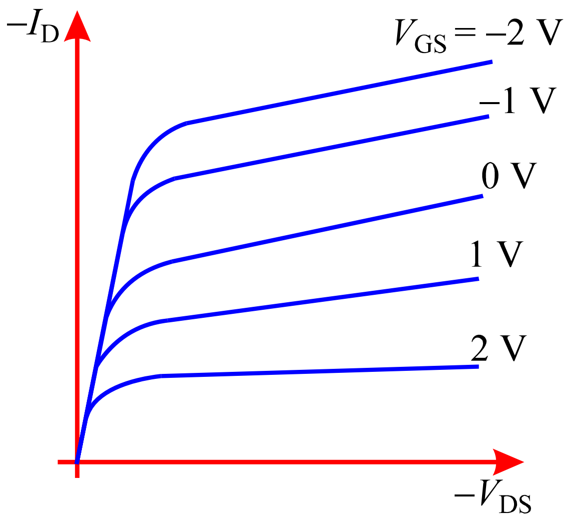


Fig.33 Curvas características de saída de um dispositivo *p*-MOSFET tipo depleção.

MOSFET TIPO ENRIQUECIMENTO

O MOSFET tipo enriquecimento é composto por duas regiões semicondutoras isoladas entre si pelo material semicondutor do substrato. Sobre esse conjunto estão depositadas uma camada de óxido isolante e uma camada metálica formadora da porta de controle, conforme ilustrado na **Fig.34**.

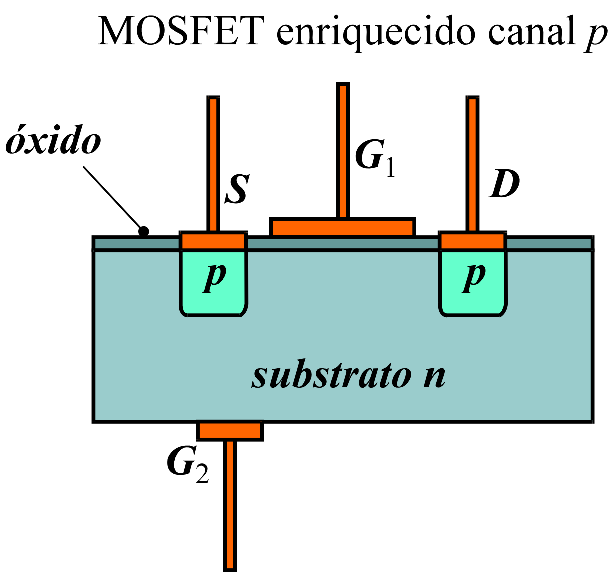


Fig.34 Estrutura de um MOSFET tipo enriquecimento, canal *p*.

As representações de circuito de MOSFETs tipo enriquecimento canal *p* e canal *n* estão mostradas na **Fig.35**, e diferem apenas no sentido das setas do terminal fonte.

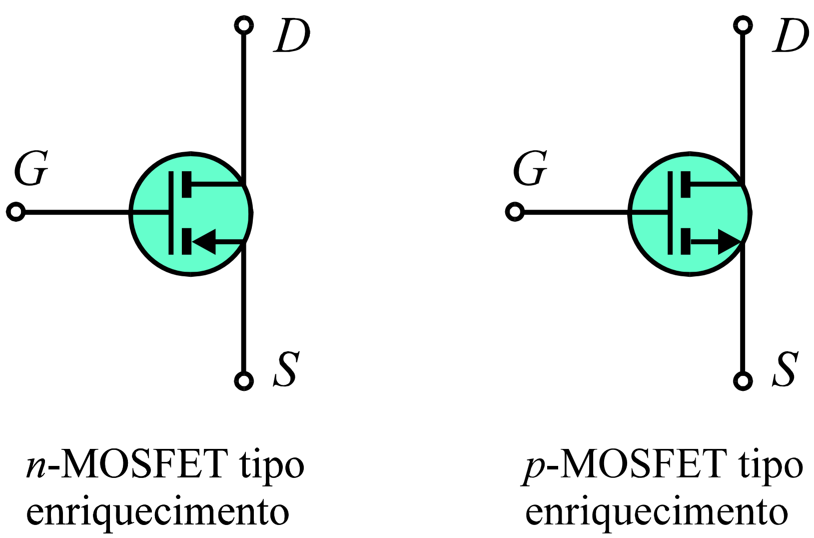


Fig.35 Representações de circuito de MOSFETs tipo enriquecimento.

Princípio de funcionamento

Para o caso de um dispositivo de canal *p*, ilustrado na **Fig.36**, quando o terminal porta fica submetido ao mesmo potencial do terminal fonte, a junção *pn* formada entre dreno e substrato fica inversamente polarizada, impedindo o fluxo de corrente. Por essa razão estes dispositivos são muitas vezes denominados de bloqueadores, como sugerem as representações de circuito com canal interrompido ilustradas na **Fig.35**.

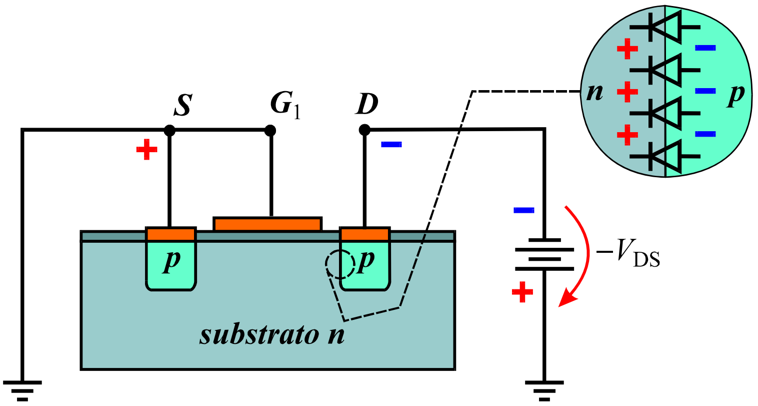


Fig.36 MOSFET tipo enriquecimento, canal *p* com porta aterrada.

Aplicando-se um potencial negativo à porta do dispositivo, a estrutura capacitiva metal-óxido-semicondutor propicia a indução de cargas positivas na região do substrato próxima à junção com o óxido, conforme ilustrado na **Fig.37**.

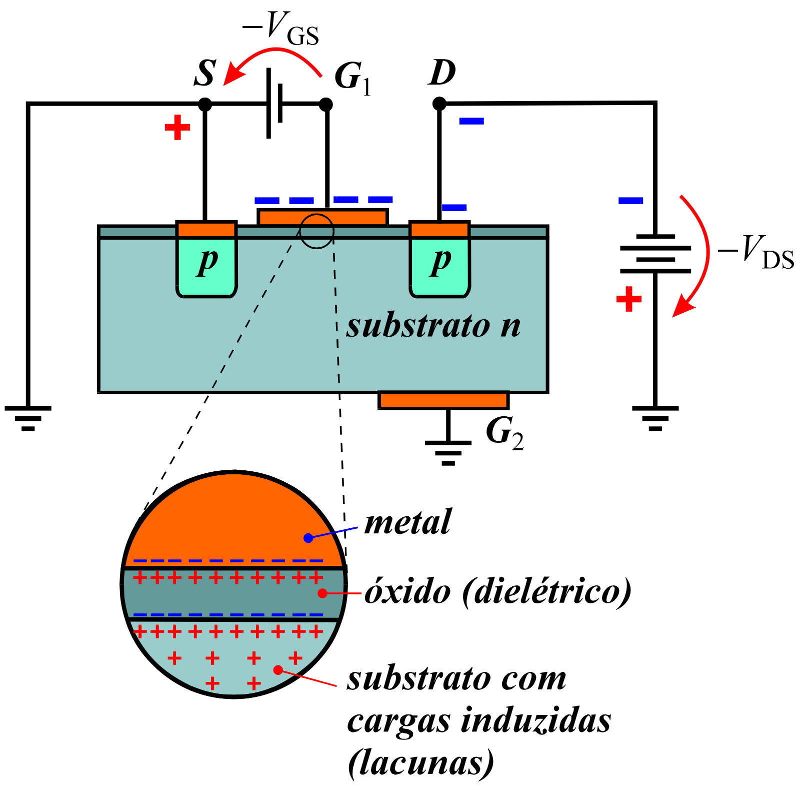


Fig.37 Indução de cargas positivas em um MOSFET tipo enriquecimento, canal *p*, quando a porta fica submetida a um potencial negativo.

A região de cargas induzidas positivas no substrato forma um canal de condução entre as regiões semicondutoras da fonte e do dreno, permitindo o fluxo de uma corrente I_D, como mostrado na **Fig.38**. Como pode ser aí observado, esse efeito equivale à formação de um canal *p* entre fonte e dreno.

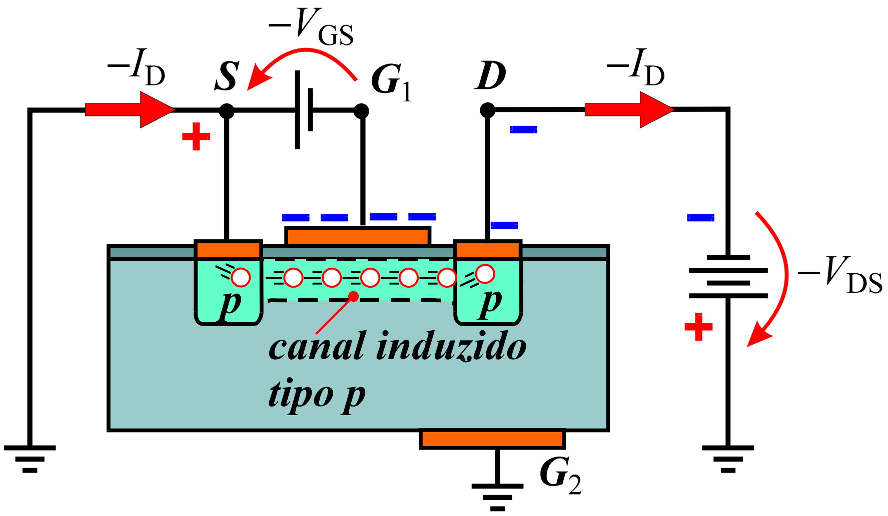


Fig.38 Fluxo de corrente em um MOSFET tipo enriquecimento, canal *p*.

A corrente I_D depende diretamente do potencial aplicado à porta, uma vez que este é o fator determinante da quantidade de cargas induzidas no canal. As curvas características de saída de um dispositivo MOSFET tipo enriquecimento, canal *p* estão mostradas no gráfico da **Fig.39**.

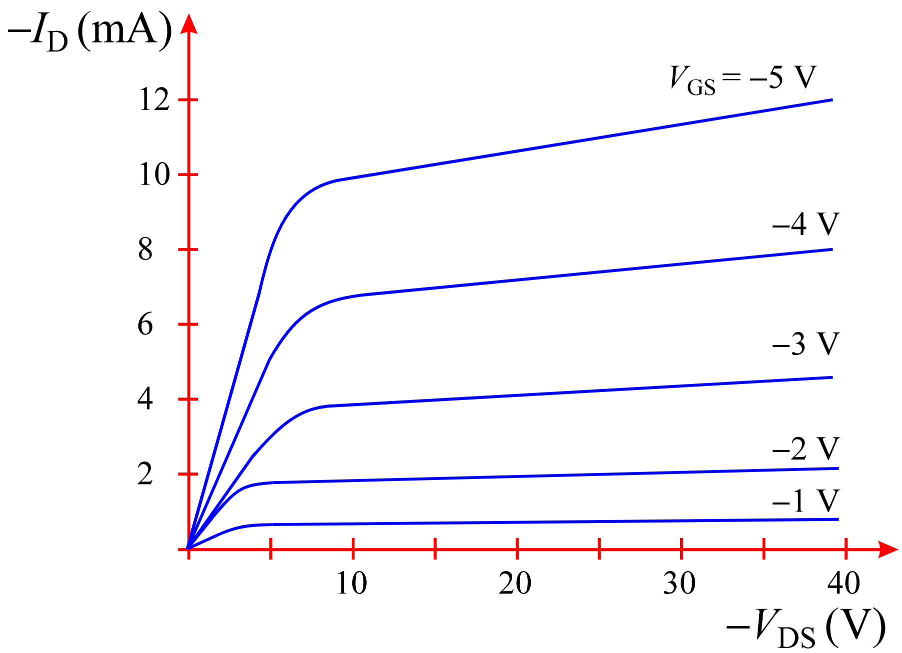


Fig.39 Curvas características de saída de um dispositivo MOSFET tipo enriquecimento, canal *p*.

Proteção da porta

O terminal porta é isolado do restante da estrutura de um MOSFET pela camada de óxido. Essa camada é extremamente fina de forma que sua capacidade dielétrica de isolação é efetiva apenas a baixas tensões. Quando o MOSFET não está sendo utilizado, a estrutura capacitiva metal-óxido-semicondutor tende a armazenar eletricidade estática, o que pode ao fim de um período provocar a degradação da película isolante. Por essa razão, a seguinte precaução deve ser observada:

Dispositivos MOSFET que não estejam em uso devem ser armazenados com os terminais inseridos em espuma condutiva ou curto-circuitados, não devendo-se tocar nos terminais para que sejam evitados danos ao dispositivo.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Existem duas categorias de transistor de efeito de campo. Quais são elas?

2. Faça um desenho da estrutura de um JFET e identifique os seus terminais.

3. Faça um desenho das representações simbólicas correspondentes ao *p*-JFET e ao *n*-JFET, identificando os terminais correspondentes.

4. Em condições normais de operação, como deve ser feita a polarização de um *p*-JFET? E de um *n*-JFET?

5. O que é tensão de pinçamento de um JFET?

6. Com porta aterrada um dispositivo *p*-JFET exibe uma tensão de pinçamento V_{P0} = 10 V. Que tensão V_{GS} deve ser aplicada para cortar o dispositivo?

7. Quais são as regiões de operação de um *p*-JFET e quais são suas características?

8. Faça um desenho da estrutura de um MOSFET tipo depleção e identifique os componentes da estrutura.

9. Desenhe as representações simbólicas de MOSFETs tipo depleção, canal *p* e canal *n*, com a identificação dos terminais.

10. Que característica diferencia um MOSFET tipo depleção de um JFET?

11. Desenhe a estrutura de um MOSFET tipo enriquecimento, identificando os componentes da estrutura.

12. Desenhe as representações simbólicas de MOSFETs tipo enriquecimento, canal *p* e *n*, com a identificação dos terminais.

13. Que característica diferencia o MOSFET tipo enriquecimento do MOSFET tipo depleção?

BIBLIOGRAFIA

CIPELLI, Antônio Marco Vicari & SANDRINI, Waldir João. Teoria e desenvolvimento de projetos de circuitos eletrônicos, 7ª. edição, Érica, São Paulo (1983).

MILLMAN, Jacob & HALKIAS, Christos C. Eletrônica: dispositivos e circuitos, Vol.2, McGraw- Hill do Brasil, São Paulo (1981).

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Introdução

A principal característica de um transistor de efeito de campo reside em sua altíssima impedância de entrada. Essa característica torna os FETs praticamente ideais para a utilização em amplificadores de entrada em receptores de rádio, osciloscópios, multímetros e outros instrumentos de precisão.

Este fascículo trata das técnicas de polarização e de amplificação empregando o FET, juntamente com uma análise comparativa do comportamento de circuitos empregando tais dispositivos em relação àqueles baseados no transistor bipolar.

Para a boa compreensão do conteúdo e desenvolvimento das atividades contidas neste fascículo, o leitor deverá estar familiarizado com os conceitos relativos a:

- Transistor bipolar: ponto de operação
- Transistor de efeito de campo.

Amplificação com FET

A amplificação de sinais em situações que demandem uma alta impedância de entrada é uma das aplicações mais importantes dos transistores de efeito de campo, citando-se por exemplo:

- Entrada de sinal em osciloscópios.
- Estágio inicial de sintonizadores de FM.

POLARIZAÇÃO DO FET

As condições de funcionamento do circuito amplificador são determinadas pela forma de polarização do FET. Na análise a seguir, considera-se como exemplo a polarização de um *n*-JFET em um circuito na configuração **fonte comum**, mostrada na **Fig.1**.

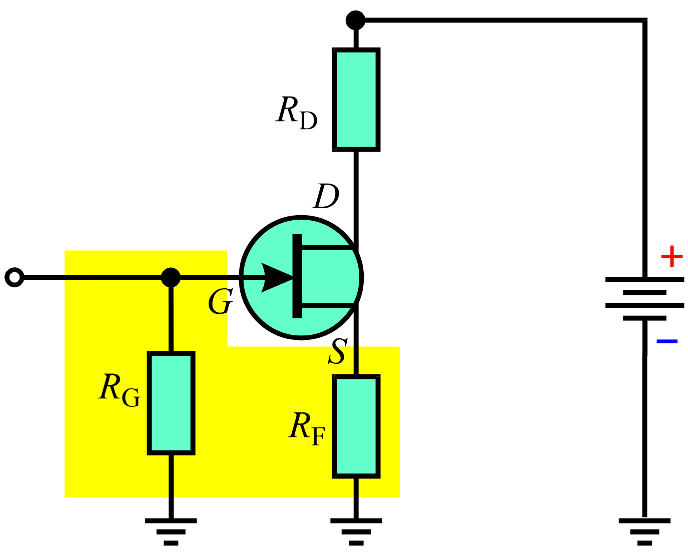


Fig.1 Circuito amplificador a FET na configuração fonte comum.

POLARIZAÇÃO DO TERMINAL DRENO

A operação normal do *n*-JFET é obtida quando o terminal dreno é mantido a um potencial positivo em relação ao terminal fonte. Um resistor de dreno R_D em conjunto com uma fonte de alimentação pode ser utilizado para este fim, na forma mostrada na **Fig.1**. O resistor R_D assume um papel semelhante àquele desempenhado pelo resistor de coletor em circuitos que utilizam transistores bipolares.

POLARIZAÇÃO DO TERMINAL PORTA

Em condições normais de operação do *n*-JFET o terminal *G* fica submetido a um potencial inferior àquele do terminal *S*. O método mais usual para obtenção dessa relação entre potenciais, denominado de **autopolarização** ou polarização por fonte, ocorre naturalmente pelo uso dos resistores R_G e R_F, mostrados na **Fig.1**.

O resistor R_G no circuito das **Figs.1** e **2**, é de alta resistência de forma a preservar a alta impedância de entrada do JFET. Assim a tensão e corrente através de seus terminais são muito pequenas. Nessas condições, o terminal porta pode ser considerado praticamente aterrado, ou seja,

$$V_G \approx 0 \text{ V}$$

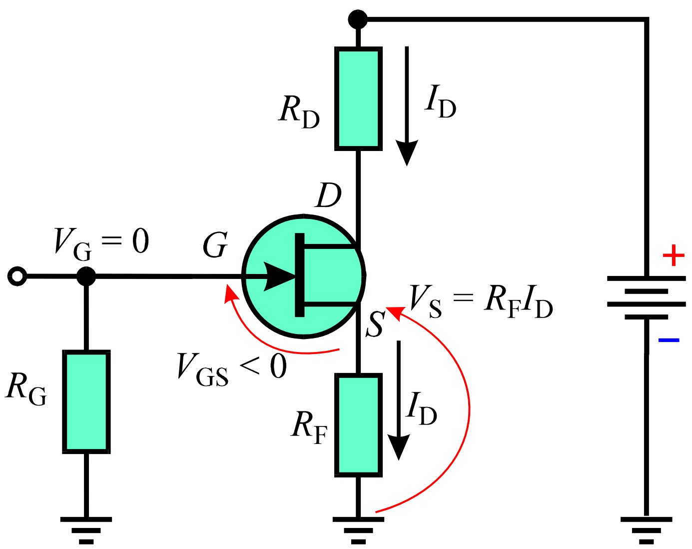


Fig.2 Circuito da **Fig.1** com os parâmetros elétricos estabelecidos sobre os resistores R_G e R_F.

Como ilustrado na **Fig.2**, a corrente I_D provoca uma queda de tensão através do resistor R_F, tornando o terminal *S* positivo em relação ao terra. Como o terminal *G* está praticamente aterrado, conclui-se que o terminal *S* fica assim mantido a um potencial superior àquele do terminal *G*. Esse é o efeito de autopolarização, mencionado anteriormente.

ESTÁGIO AMPLIFICADOR COM FET

O circuito completo de um estágio amplificador utilizando o dispositivo *n*-JFET é composto da fonte de alimentação, juntamente com os resistores de polarização e os capacitores de acoplamento e desacoplamento, conforme ilustrado na **Fig.3**.

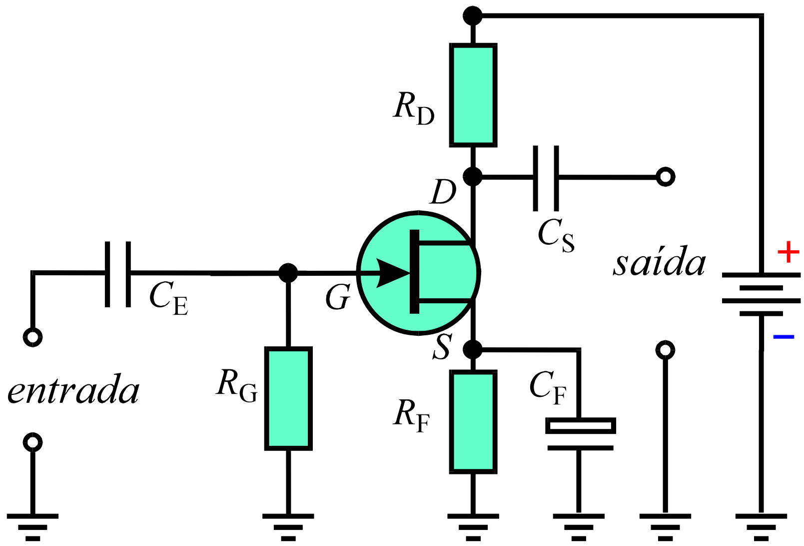


Fig.3 Estágio amplificador empregando um *n*-JFET.

Os capacitores de entrada e saída, C_E e C_S, respectivamente, não são em geral do tipo eletrolítico devido às altas impedâncias de entrada e saída associadas ao dispositivo FET. O capacitor que pode ser do tipo eletrolítico no circuito da **Fig.3**, é aquele designado por C_F , utilizado no desacoplamento do terminal fonte.

Esquemas semelhantes àquele mostrado na **Fig.3** podem ser utilizados para a implementação de estágios amplificadores baseados em dispositivos *p*-JFET e MOSFET do tipo depleção, canais *p* e *n*.

Dispositivos MOSFET do tipo enriquecimento exigem o emprego da técnica de polarização com divisor de tensão, devido ao princípio de operação peculiar daquela classe de dispositivos. Os diagramas de circuito normalmente

utilizados para dispositivos MOSFET canal *n* e canal *p*, estão representados na **Fig.4**.

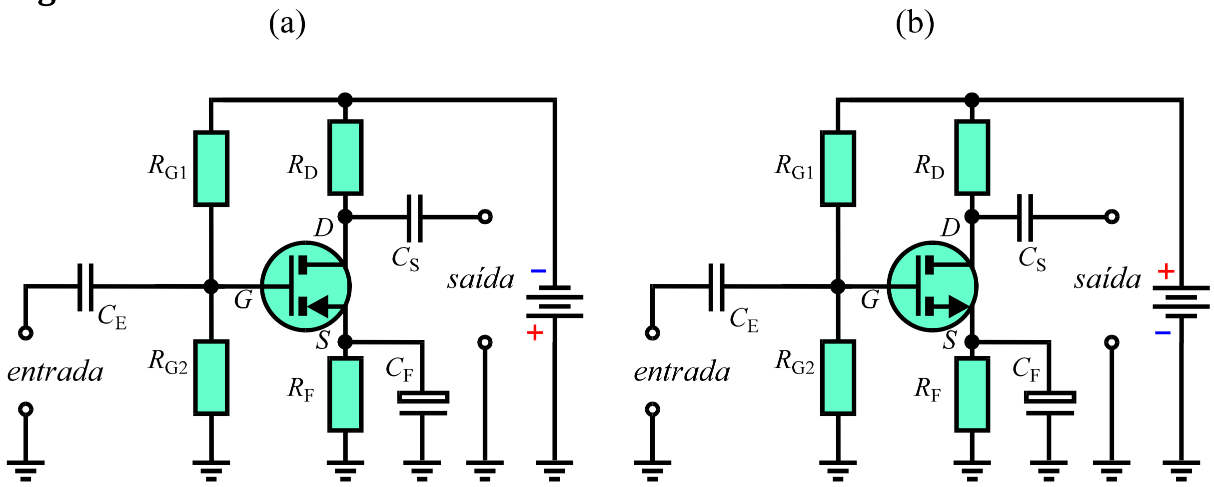


Fig.4 Diagramas de circuito para estágios amplificadores baseados em dispositivos:**(a)** MOSFET canal *n*, **(b)** MOSFET canal *p*.

Para os circuitos mostrados na **Fig.4**, o valor da corrente quiescente I_{DQ} é estabelecido pela escolha dos valores de resistência R_{G1}, R_{G2} e R_F.

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O princípio de funcionamento de qualquer estágio amplificador com FET, pode ser analisado com base no circuito configurado com dispositivo do tipo *n*-JFET, conforme ilustrado na **Fig.5**.

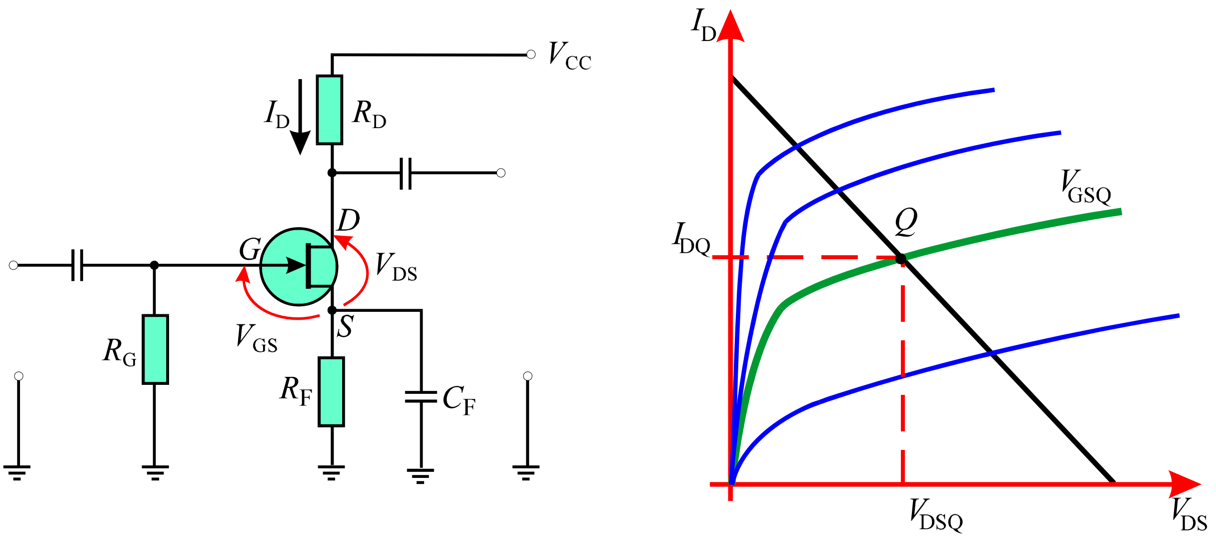


Fig.5 Estágio amplificador baseado em dispositivo *n*-JFET.

As curvas características de saída, mostradas na **Fig.5**, juntamente com a reta de carga do circuito, estabelecem os valores quiescentes I_{DQ} e V_{DSQ} para a

corrente de dreno e tensão dreno-fonte, respectivamente e o valor V_{GSQ} para a tensão entre porta e fonte.

Aplicando-se uma tensão senoidal na entrada do circuito da **Fig.5**, com a forma indicada na **Fig.6**, a tensão de entrada na porta do FET é dada por

$$V_{GS} = V_{GSQ} + V_{ent} \tag{1}$$

onde V_{ent} é a tensão associada ao sinal de entrada.

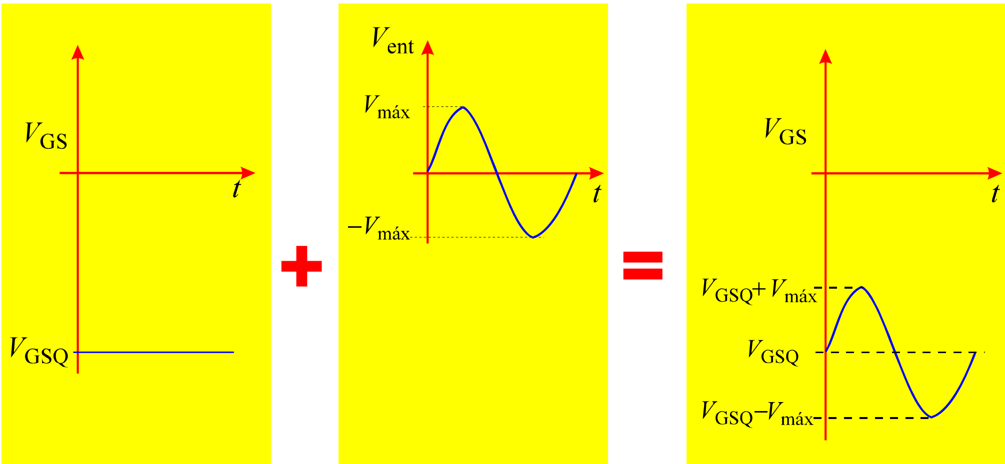


Fig.6 Forma de onda da tensão de entrada aplicada ao estágio amplificador.

No semiciclo em que a tensão de entrada é positiva e crescente, a tensão V_{GS} aumenta, produzindo o deslocamento do ponto de operação ao longo da reta de carga, conforme ilustrado na **Fig.7**. Quando a tensão de entrada atinge o valor $V_{máx}$ o ponto de operação está localizado no ponto Q', conforme indicado na **Fig.7**. Naquele ponto a tensão entre porta e fonte torna-se

$$V_{GSQ'} = V_{GSQ} + V_{máx}$$

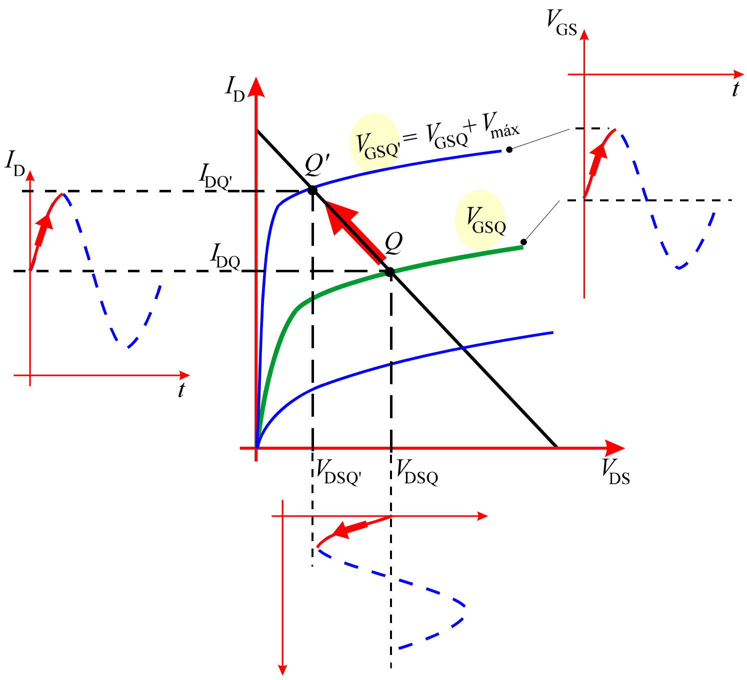


Fig.7 Deslocamento do ponto de operação devido a uma tensão crescente positiva na entrada.

e a corrente de dreno e tensão dreno-fonte valem, respectivamente, $I_{DQ'}$ e $V_{DSQ'}$.

A partir do momento em que a tensão de entrada começa a diminuir, o ponto de operação desloca-se ao longo da reta de carga, até o instante de tempo em que a tensão de entrada atinge o valor mínimo $-V_{máx}$.

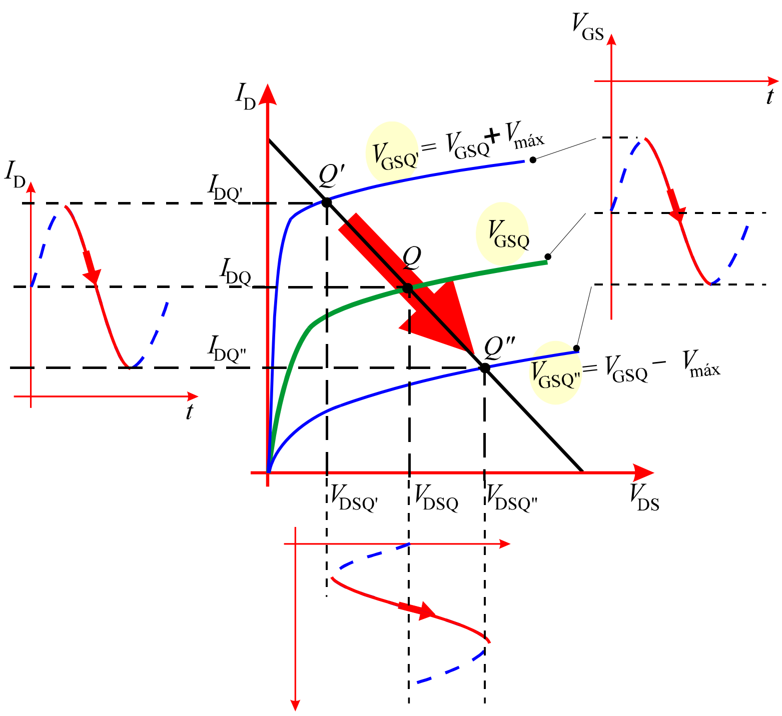


Fig.8 Deslocamento do ponto de operação devido a uma tensão decrescente na entrada.

Nesse momento o ponto de operação está situado sobre o ponto *Q*" indicado na **Fig.8**. Nesse ponto tem-se

$$V_{GS} = V_{GSQ} - V_{máx}$$

e a corrente de dreno e tensão dreno-fonte se tornam $I_{DQ"}$ e $V_{DSQ"}$, respectivamente.

O ciclo se completa quando a tensão de entrada retorna ao valor nulo trazendo o ponto de operação do circuito de volta a sua posição inicial *Q*, conforme ilustrado na **Fig.9**.

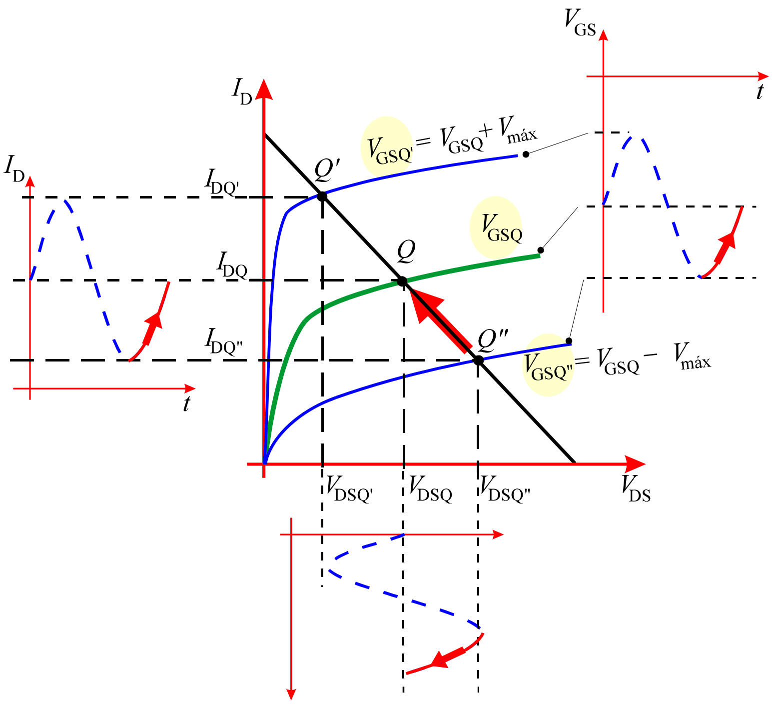


Fig.9 Deslocamento do ponto de operação devido a uma tensão negativa crescente na entrada.

Pela análise do ponto de operação do circuito de acordo com as **Figs.7** a **9**, conclui-se que a tensão de saída, após a

filtragem do nível *dc* pelo capacitor C_S, é uma versão invertida da tensão de entrada, conforme ilustrado na **Fig.10**.

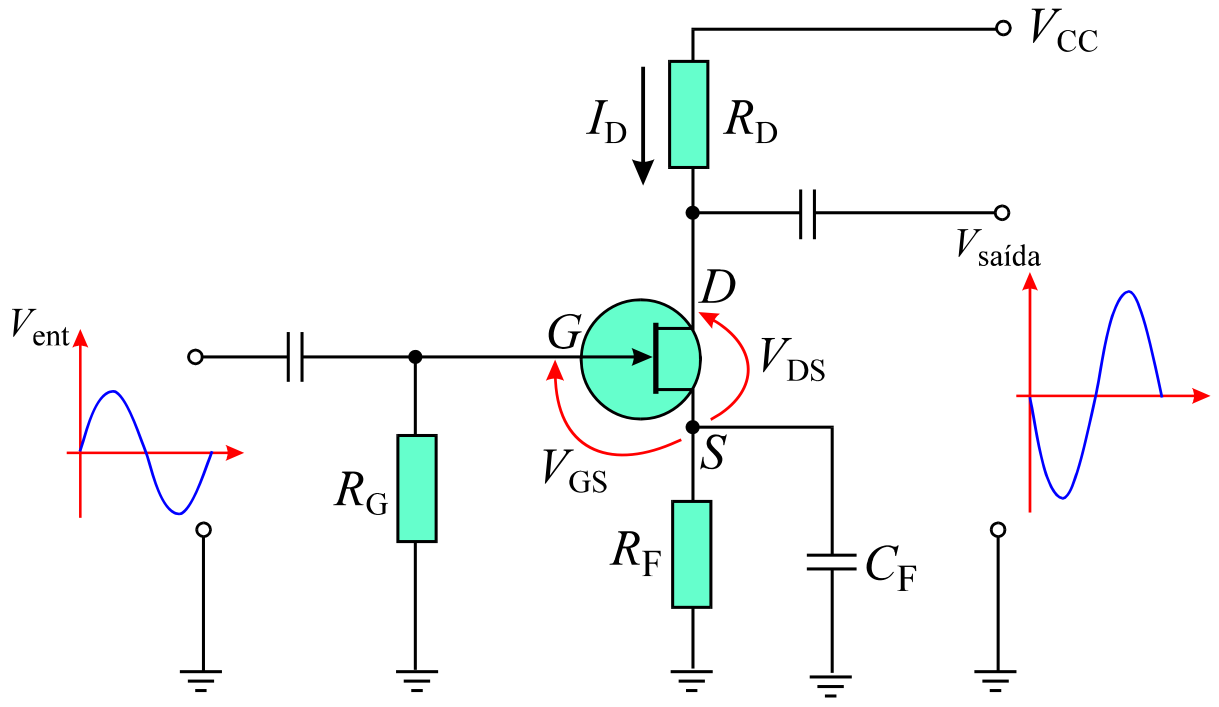


Fig.10 Tensões de entrada e saída no circuito amplificador baseado em um dispositivo *n*-JFET.

CARACTERÍSTICAS DOS ESTÁGIOS AMPLIFICADORES A FET

Os parâmetros característicos de importância em estágios amplificadores a FET são:

- Impedância de entrada.
- Ganho de tensão.

IMPEDÂNCIA DE ENTRADA

Como em operação normal, a junção *pn* associada aos terminais da porta e da fonte permanece inversamente polarizada, a impedância da junção porta-fonte é muito alta. Dessa forma, a impedância de entrada do estágio amplificador a FET é determinada exclusivamente pelos valores dos parâmetros associados aos elementos de polarização do circuito.

O arranjo em paralelo do resistor R_G com a entrada do dispositivo FET, mostrado na **Fig.11**, implica que a impedância de entrada do estágio amplificador é dada por

$$Z_i = R_G$$

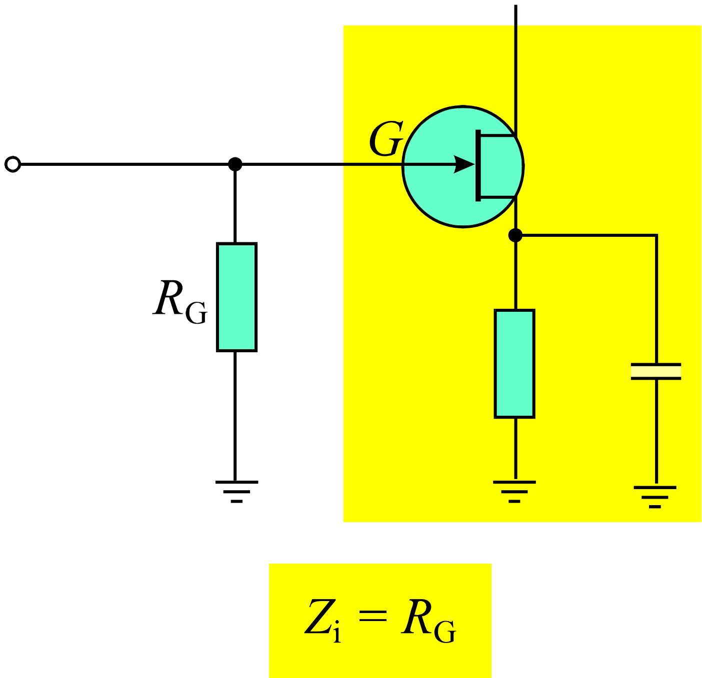


Fig.11 Porção de entrada de um amplificador FET.

Como o resistor R_G é normalmente escolhido com um valor de resistência de algumas centenas de quiloohms, a impedância de entrada de amplificadores FET pode ser considerada altíssima.

GANHO DE TENSÃO

Em geral, os estágios amplificadores a FET exibem um pequeno ganho de tensão, que pode variar tipicamente entre 3 e 15. Apesar do baixo ganho, FETs são largamente utilizados na confecção de estágios amplificadores de alta impedância de entrada.

A **Tabela 1** resume as principais características e diferenças existentes entre amplificadores que utilizam transistor bipolar e aqueles baseados no dispositivo FET.

Tabela 1 Parâmetros e características principais associadas a estágios amplificadores baseados em transistores bipolar e em dispositivos FET.

	Tipo de estágio amplificador	
Parâmetro	**Transistor bipolar**	**FET**
Impedância de entrada	–10 Ω a 1 kΩ –Uso na amplificação de sinais provenientes de fontes de baixa impedância.	–100 kΩ a 1 MΩ –Operação independe da impedância da fonte geradora do sinal.
Corrente de fuga	Pequena, mas provoca alterações no ponto de operação.	–Muito pequena. (alguns nanoampères) –Pode ser compensada pela escolha adequada dos elementos de polarização.
Resposta em freqüência	Capacitâncias de junção provocam diminuição do ganho em altas freqüências.	Resposta superior àquela associada ao transistor bipolar.
Ganho de tensão	Elevado, podendo atingir um ganho próximo de 50.	Pode atingir um ganho máximo próximo de 20.
Ganho de potência	Pode atingir valores elevados pela escolha adequada dos elementos do circuito.	Muito elevado, como resultado da baixíssima dissipação de potência do dispositivo.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Cite algumas aplicações que utilizam o transistor de efeito de campo.

2. Em condições normais de operação qual é o valor aproximado do potencial do terminal porta de um estágio amplificador com JFET?

3. A que propósito servem os resistores R_G, R_D e R_F e o capacitor C_F de um estágio amplificador com JFET?

4. Quais são os parâmetros característicos de um estágio amplificador a JFET?

5. Quais são as características principais que diferenciam amplificadores a JFET daqueles que utilizam o transistor bipolar?

BIBLIOGRAFIA

CIPELLI, Antônio Marco Vicari & SANDRINI, Waldir João, Teoria e desenvolvimento de projetos de circuitos eletrônicos, 7ª. edição, Érica, São Paulo (1983).

MALVINO, Albert Paul, Eletrônica, Vol.2, McGraw-Hill do Brasil, São Paulo (1986)

MILLMAN, Jacob & HALKIAS, Christos C. Eletrônica: dispositivos e circuitos, Vol.2, McGraw- Hill do Brasil, São Paulo (1981).

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Introdução

A eletrônica é uma das áreas do conhecimento humano que tem experimentado uma grande evolução. De fato, em poucas décadas a tecnologia progrediu da válvula ao transistor bipolar, ao FET e aos circuitos integrados.

E o que são circuitos integrados? De forma resumida, circuitos integrados são **circuitos eletrônicos completos** colocados dentro de um único encapsulamento, com vários terminais de ligação.

Este fascículo apresenta uma breve introdução à tecnologia de fabricação de circuitos integrados, com o objetivo de fornecer informações indispensáveis para que o leitor se familiarize com as técnicas mais recentes de produção desses componentes em larga escala.

Para a boa compreensão do conteúdo e desenvolvimento das atividades contidas neste fascículo, o leitor deverá estar familiarizado com os conceitos relativos a:

- Diodo semicondutor.
- Transistor de efeito de campo.

Noções básicas

O circuito integrado, normalmente denominado pela sigla *CI*, é um conjunto de circuitos eletrônicos, com finalidades bem definidas, interconectados em um único encapsulamento. Formas típicas desses componentes estão ilustradas na **Fig.1**.

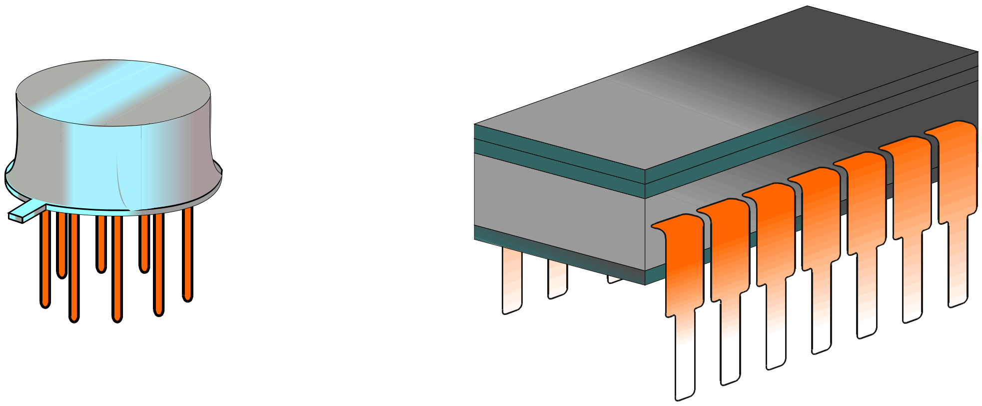


Fig.1 Duas formas típicas de circuitos integrados.

Circuitos integrados são utilizados em equipamentos eletrônicos com o objetivo de reduzir o tamanho, custo e consumo de potência, e facilitam o processo de manutenção desses equipamentos.

PROCESSO DE FABRICAÇÃO

A fabricação de *CIs* é realizada a partir de cristais dopados de silício, que são inicialmente produzidos na forma de lingotes. Com o uso de uma lâmina de serra impregnada com partículas de diamante, os lingotes de aproximadamente 10 cm de diâmetro são cortados na forma de pastilhas circulares ou **bolachas** com cerca de 0,5mm de espessura, como ilustrado na **Fig.2**.

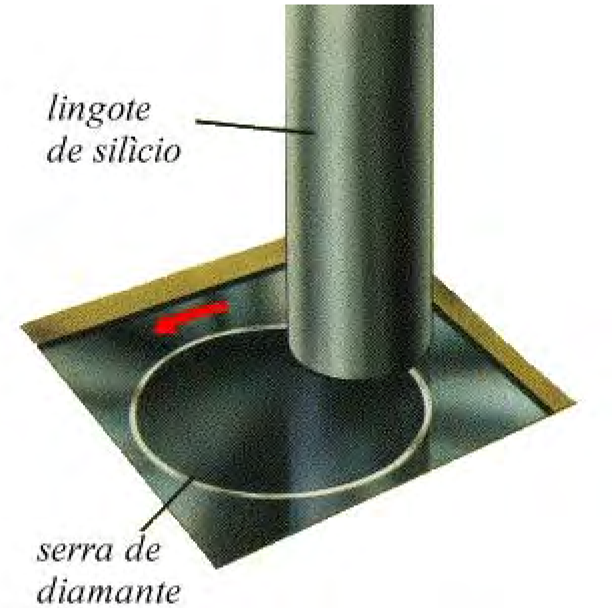


Fig.2 Corte de um lingote de silício com serra de diamante.

Após o corte, um dos lados de cada bolacha de silício é submetido a um processo de polimento, produzindo uma superfície de qualidade óptica, como ilustrado na **Fig.3**.



Fig.3 Aspecto das bolachas de silício após corte e polimento.

Para que as bolachas de silício estejam prontas para uso como substrato na fabricação de *CIs*, elas passam por um processo químico que permite a formação de uma camada fina de silício com dopagem distinta daquela do substrato.

Conforme ilustrado na **Fig.4**, esse processo envolve a fixação das bolachas em um suporte rotativo no interior de um reator. A temperaturas entre 1.000 °C e 1.300 °C uma mistura contendo silício na forma gasosa e gases dopantes flui no interior do reator. Essa técnica, conhecida como **deposição por vapor químico**, permite a formação de um filme de silício, que apesar de exibir dopagem distinta, mantém a mesma estrutura cristalina da bolacha de silício pré-existente. A camada de silício formada com essas características recebe a denominação de **camada epitaxial**. No exemplo ilustrado na **Fig.4**, a bolacha de silício é do tipo *n* e a camada epitaxial formada após o processo é do tipo *p*.

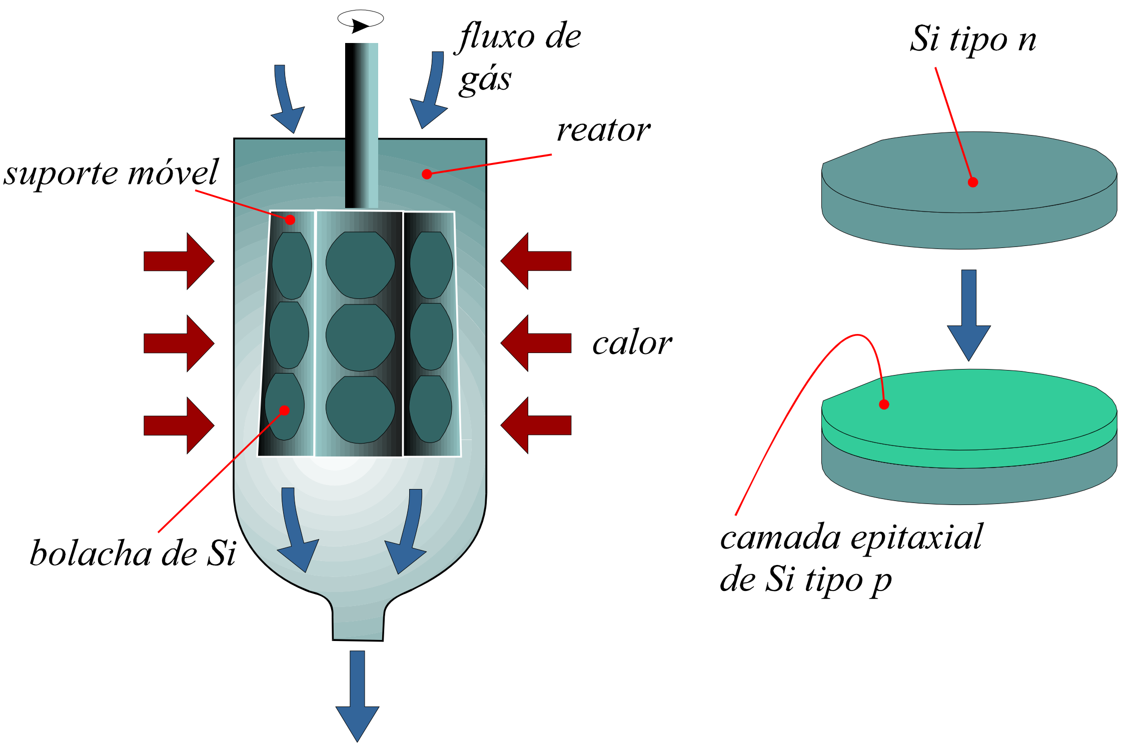


Fig.4 Técnica de deposição epitaxial de silício por vapor químico para a formação de uma camada com dopagem distinta daquela correspondente à bolacha original.

Em um ambiente isento de impurezas, dezenas de bolachas de silício são colocadas em um recipiente de quartzo, como mostrado na **Fig.5**, e introduzidas em um forno, onde serão submetidas a uma temperatura máxima de 1.250 °C, para a oxidação da superfície. A camada de óxido, além de ser eletricamente isolante, previne a infiltração de átomos estranhos em pontos da superfície da bolacha.



Fig.5 Bolachas de silício empilhadas em suporte de quartzo. Após tratamento em banho de vapor a uma temperatura de 1.250°C, forma-se uma fina camada de dióxido de silício por sobre a camada epitaxial.

O projeto e desenho do circuito integrado é elaborado em uma escala centenas de vezes maior que o tamanho do circuito original, sendo depois miniaturizado até o tamanho final. Através de sucessivas exposições e deposições de material semicondutor, os componentes são formados e interligados dando origem a um circuito completo.

O processo de fabricação de um *CI* envolve basicamente a realização das seguintes etapas:

- Elaboração do desenho do circuito em escala ampliada, iniciando o processo de confecção de integrados. O projeto é geralmente realizado com o uso de ferramentas computacionais que facilitam o processo de armazenagem dos dados do circuito bem como a ampliação ou redução precisa do desenho.

- O desenho do circuito reduzido à sua forma original é reproduzido milhares de vezes, com unidades idênticas do desenho posicionadas lado a lado por sobre uma área circular que irá corresponder à área da bolacha de silício.

- Os processos subseqüentes para a implantação em larga escala de um grupo de *CIs* por sobre a bolacha de silício envolvem estágios de desgaste e revelação fotográfica, baseados nos princípios da fotolitografia. Para isso, máscaras de vidro são fabricadas, de forma a permitir o desgaste ou adição seletiva de material em regiões da superfície, de acordo com o desenho do circuito.

O exemplo a seguir ilustra como a técnica de fotolitografia pode ser utilizada para remoção seletiva de óxido da bolacha de silício, ilustrada de forma simplificada na **Fig.6**.

Como mostrado na **Fig.7**, a superfície oxidada é coberta inicialmente por uma resina sensível à luz ultravioleta. A resina é amplamente conhecida na área de microeletrônica pela denominação inglesa *photoresist*.

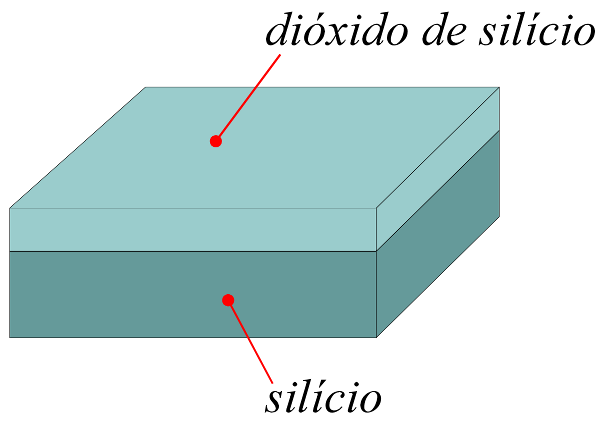


Fig.6 Porção da bolacha de silício a ser tratada por fotolitografia.

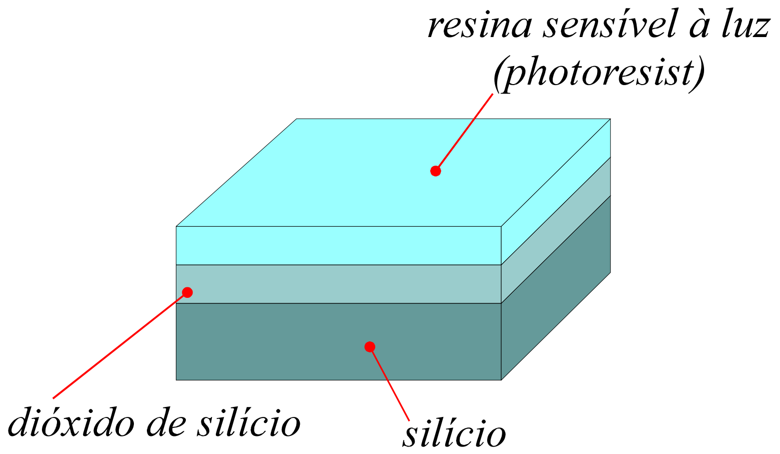


Fig.7 Adição de uma camada de resina à estrutura da **Fig.6**.

Uma máscara de quartzo tendo regiões transparentes e opacas é posicionada por sobre a estrutura, conforme ilustrado na **Fig.8**. A porção da resina exposta à radiação ultravioleta torna-se enrijecida e resistente à ação dos agentes químicos utilizados na etapa de desgaste.

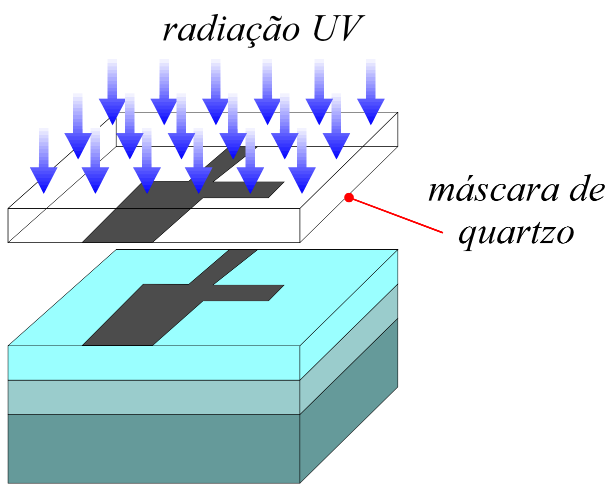


Fig.8 Exposição da estrutura à luz UV através de uma máscara de quartzo.

A porção da resina que não foi exposta à radiação UV pode ser removida facilmente com o uso de agentes químicos inorgânicos, resultando na estrutura mostrada na **Fig.9**.

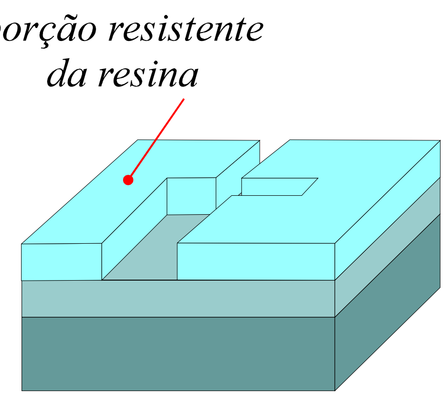


Fig.9 Estrutura da **Fig.8** após remoção da porção não exposta da resina.

A porção exposta do óxido pode ser removida por processos de desgaste químico ou por um processo de desgaste a seco que utiliza íons de alta energia produzidos em uma chama de plasma, conforme ilustrado na **Fig.10**

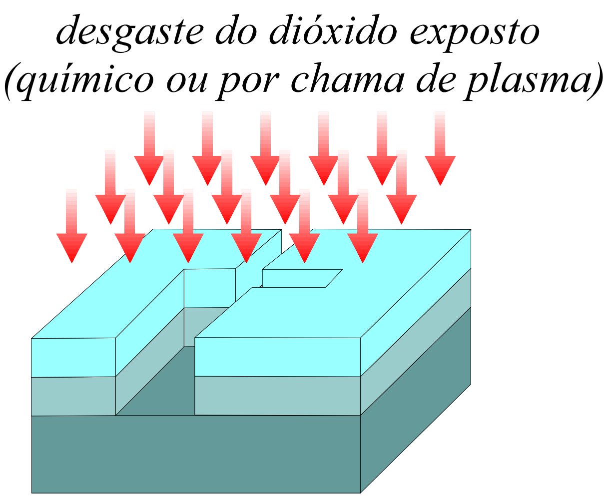


Fig.10 Remoção de óxido por desgaste químico ou por chama de plasma.

Com o uso de um solvente orgânico a porção endurecida da resina pode ser removida, resultando na estrutura mostrada na **Fig.11**.

O uso do processo descrito anteriormente permite que uma porção bem definida da superfície do silício fique desprotegida da camada de óxido, podendo ser posteriormente dopada com o uso de técnicas de implantação iônica, conforme discutido a seguir.

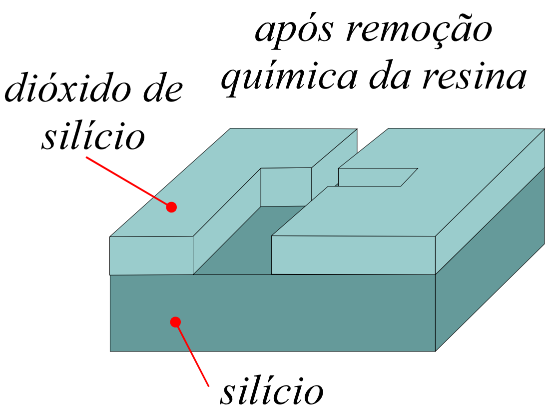


Fig.11 Estrutura final da porção da bolacha de silício.

EXEMPLO DE FABRICAÇÃO DE UM FET

Os processos básicos necessários à fabricação de um conjunto de *CIs* em uma bolacha de silício foram descritos anteriormente. Nesta seção descreve-se a seqüência de etapas necessárias à fabricação de um componente simples, como por exemplo, o transistor de efeito de campo.

O processo de fabricação de um FET faz uso de um substrato de silício tipo *n*, coberto por uma camada epitaxial de silício tipo *p* protegida por uma camada de óxido, conforme ilustrado na **Fig.12**.

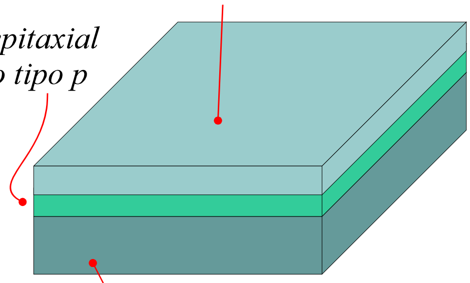


Fig.12 Estrutura inicial para fabricação de um FET.

Com o uso de um processo de fotolitografia, semelhante àquele descrito na seção anterior, parte do dióxido de silício é removida, expondo uma porção da superfície do silício tipo *p*. A estrutura é aquecida em forno a alta temperatura, de forma a permitir o crescimento de uma nova camada de óxido, dessa vez bem mais fina que a anterior, por sobre a superfície exposta do silício tipo *p*, conforme ilustrado na **Fig.13**.

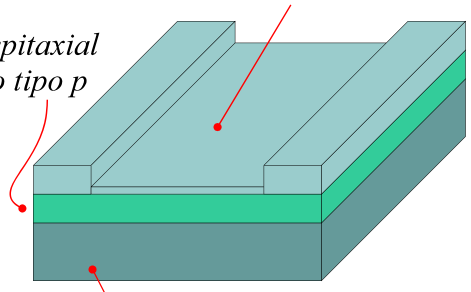


Fig.13 Estrutura do dispositivo após crescimento de uma nova camada de óxido bem mais fina que a anterior.

A superfície que foi modificada corresponde à porta do FET, e a nova camada de óxido tem uma espessura típica de 0,1 µm.

Uma camada de silício policristalino é depositada em toda a superfície da bolacha. Com o auxílio de etapas de fotolitografia e de deposição química, regiões da camada policristalina são desgastadas. Isso permite a permanência da camada de silício policristalino, apenas sobre aquelas regiões da bolacha que correspondem à porta de cada dispositivo FET, conforme mostrado na **Fig.14.**

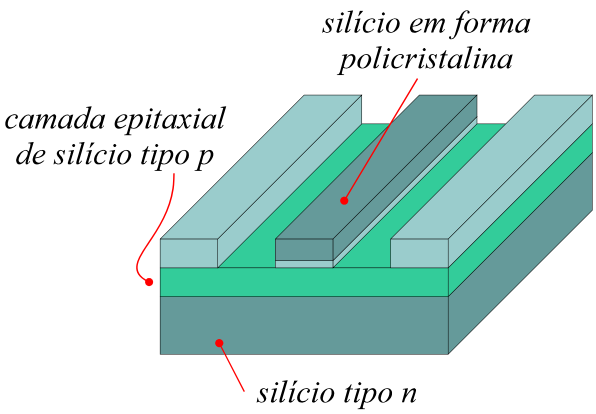


Fig.14 Estrutura após formação de uma camada de silício policristalino por sobre parte da superfície da porta.

As porções da porta do dispositivo, correspondentes à superfície exposta da camada epitaxial de silício tipo *p*, podem ser dopadas pela técnica de implantação iônica. Nessa técnica, as bolachas de silício são introduzidas em um reator e átomos ionizados são acelerados em direção à superfície da bolacha. A velocidade dos átomos, ao atingirem a superfície da camada epitaxial, determina a profundidade com que irão penetrar no interior da camada. Dessa forma é possível introduzir um determinado grau e tipo de dopagem em uma região da camada epitaxial, resultando na estrutura ilustrada na **Fig.15**.

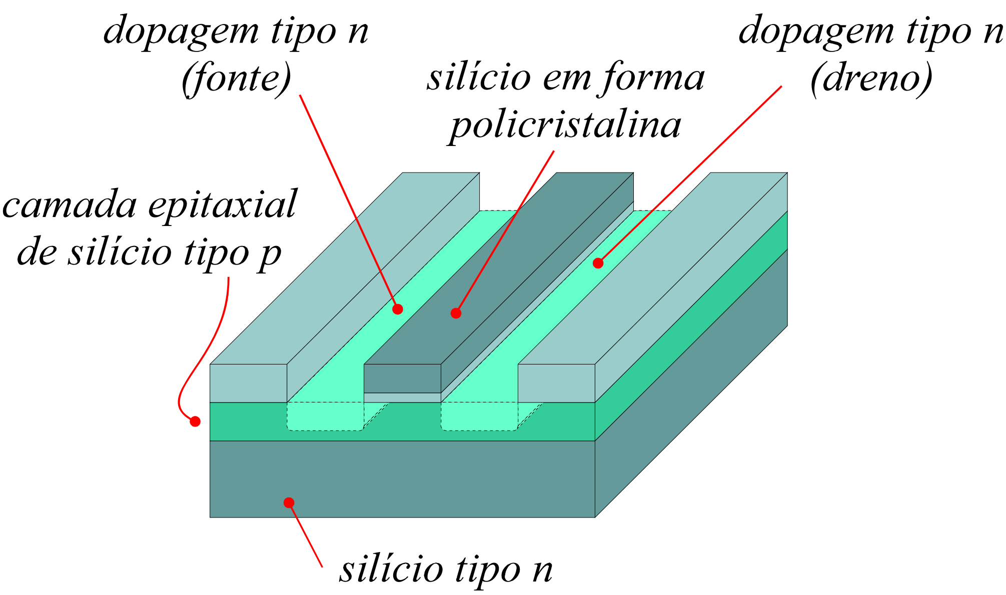


Fig.15 Estrutura do dispositivo após dopagem parcial da camada epitaxial de silício.

Para permitir o isolamento elétrico entre porta, fonte e dreno, uma camada de óxido é depositada por sobre a bolacha. Com o uso de processos de

fotolitografia, regiões da superfície do óxido são desgastadas, deixando expostas apenas as superfícies correspondentes à fonte, porta e dreno, conforme ilustrado na **Fig.16**.

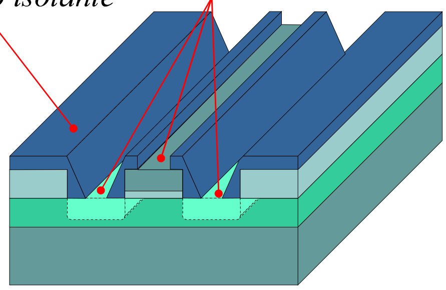


Fig.16 Estrutura do dispositivo após cobertura parcial com um óxido eletricamente isolante.

Uma camada de alumínio é depositada por toda a superfície da bolacha. Após a execução de uma etapa de fotolitografia, porções da camada de alumínio são desgastadas, resultando na estrutura final do dispositivo FET com contatos elétricos de alumínio, mostrada na **Fig.17**.

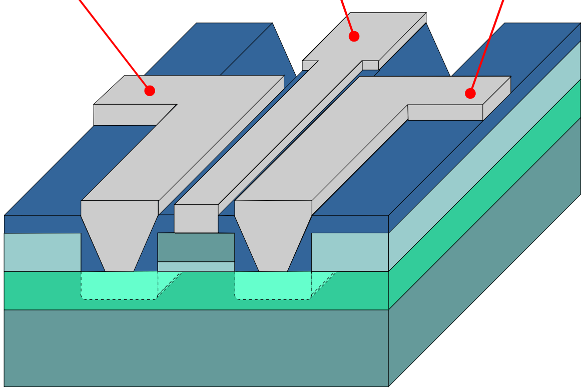


Fig.17 Estrutura final do dispositivo FET.

Procedimentos semelhantes podem ser utilizados para a fabricação de resistores, capacitores ou outros tipos de transistor, interconectados de forma a compor um circuito completo ou *chip*.

ENCAPSULAMENTO

Uma vez terminado o processo de fabricação de dispositivos ou circuitos idênticos em uma bolacha de silício, os *chips* individuais são testados e a bolacha é precisamente seccionada com o uso de uma ponta de diamante. A **Fig.18** mostra o aspecto típico de uma bolacha seccionada em *chips* prontos para encapsulamento.

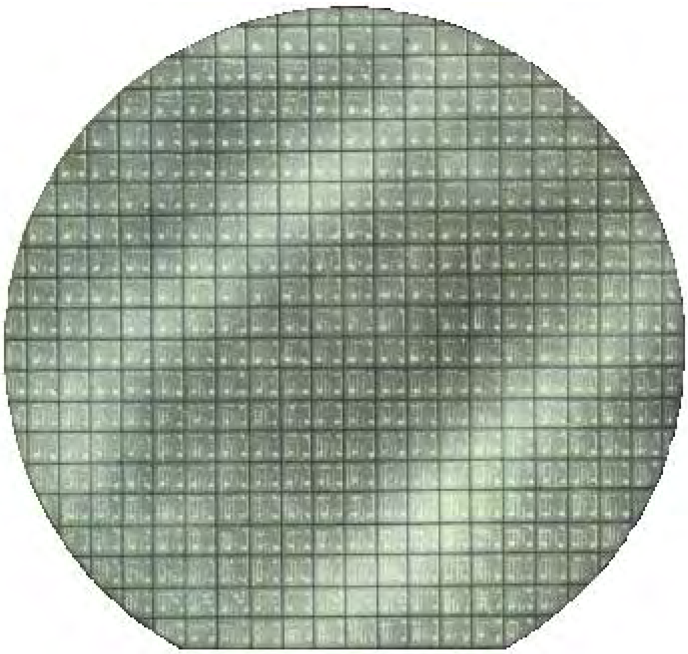


Fig.18 Aspecto de uma bolacha de silício seccionada em *chips* individuais.

O processo atual de fabricação de circuitos integrados em larguíssima escala, amplamente conhecido pela sigla *VLSI*, advinda da denominação inglesa *Very Large Scale Integration*, permite a produção de um circuito integrado com o equivalente a alguns milhões de transistores em um pequeno *chip* de aproximadamente 1 cm^2 de área.

Após a etapa de seccionamento, é necessário incorporar os terminais elétricos que permitirão a conexão do *CI* a um circuito externo. Devido ao tamanho reduzido do componente, a realização dos contatos requer a utilização de técnicas de microsoldagem de alta precisão. A **Fig.19** mostra em detalhes a porção de um *chip* e o aspecto das conexões metálicas.

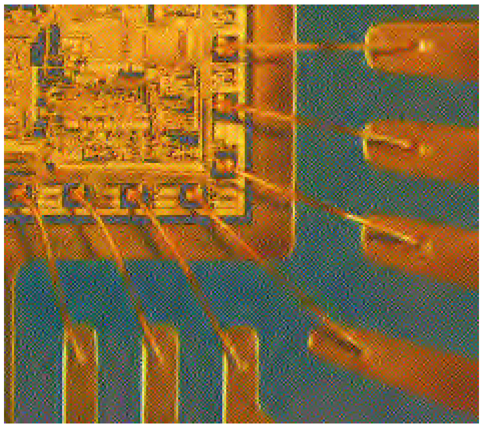


Fig.19 Vista expandida da porção de um *chip* ilustrando o aspecto dos contatos metálicos.

Uma vez realizada a soldagem, o *CI* é encapsulado. As formas típicas de encapsulamento estão mostradas na **Fig.20**, e correspondem às seguintes configurações:

- Encapsulamento circular multiterminal.
- Encapsulamento em linha dupla.
- Encapsulamento planar.

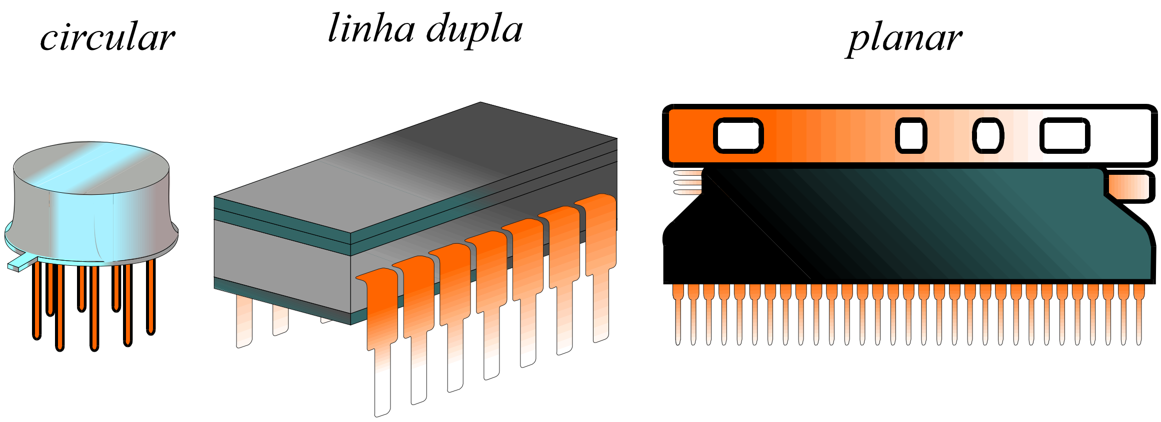


Fig.20 Formas típicas de encapsulamento de um *CI*.

A identificação das funções dos pinos de um CI deve ser feita com base no manual ou folheto de especificações do fabricante.

CONFIABILIDADE DE CIRCUITOS INTEGRADOS

Os circuitos integrados são dispositivos de alta confiabilidade. Alguns dos fatores que contribuem para que esses dispositivos tenham essa característica são:

- Redução do número de interligações entre os componentes.
- Operação em baixas tensões.
- Controle assistido por computador do processo de fabricação.

CUIDADOS DE MONTAGEM

Os *CIs* são fabricados com materiais semicondutores, sensíveis ao calor. Durante o processo de soldagem desses dispositivos, é necessário um cuidado especial para evitar danos por excesso de aquecimento.

A soldagem direta dos terminais do *CI* pode ser evitada através do uso de **soquetes**. Estes componentes podem ser soldados diretamente às placas do circuito impresso. A incorporação do *CI* ao circuito é realizada pelo simples encaixe do dispositivo ao soquete, conforme ilustrado na **Fig.21**.

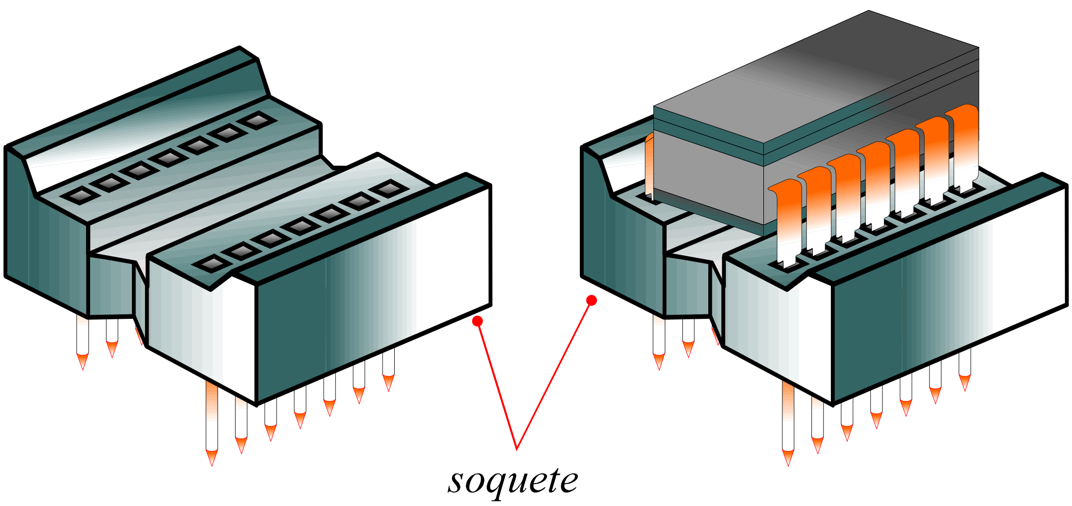


Fig.21 Aspecto típico de um soquete e forma de fixação do *CI* àquele componente.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Quais os benefícios que podem ser obtidos com o uso de circuitos integrados?

2. Qual o objetivo principal de se utilizar a camada de óxido por sobre a bolacha de silício durante o processo de produção de *CI*s?

3. Descreva brevemente como é feito o processo de desgaste de uma porção de óxido da superfície de uma bolacha de silício?

4. Descreva as etapas de fabricação de um FET a partir do que foi tratado no texto.

BIBLIOGRAFIA

SINGH, Jasprit, Semiconductor Optoelectronics, New York, McGraw-Hill, Inc., 1995.

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Introdução

O amplificador operacional é um exemplo característico de circuito eletrônico, disponível na forma de um circuito integrado, cuja utilização se estende a vários ramos da eletrônica.

Este fascículo contém uma análise detalhada das propriedades de amplificadores operacionais, com o objetivo de fornecer informações indispensáveis para que o leitor esteja apto a reparar equipamentos que utilizem aquela classe de dispositivos.

Para a boa compreensão do conteúdo e desenvolvimento das atividades contidas neste fascículo, o leitor deverá estar familiarizado com os conceitos relativos a:

- Amplificador na configuração emissor comum.
- Amplificador na configuração base comum.
- Amplificador na configuração coletor comum.

Amplificador operacional

O amplificador operacional (*AO*) é um circuito eletrônico, disponível na forma de circuito integrado, com características que se aproximam daquelas de um amplificador ideal. Sua versatilidade o torna aplicável em uma variedade de equipamentos eletrônicos, tais como aqueles utilizados em circuitos industriais, circuitos de áudio, e na filtragem de sinais, entre outros.

O termo **amplificador operacional** tem origem nas primeiras aplicações dessa classe de dispositivos que eram dirigidas para a realização de operações matemáticas de adição, subtração e multiplicação, executadas eletronicamente nos antigos computadores analógicos.

REPRESENTAÇÃO DE CIRCUITO DE UM AMPLIFICADOR OPERACIONAL

O símbolo utilizado para representar o amplificador operacional em diagramas de circuito, corresponde a um triângulo que aponta no sentido de amplificação do sinal, conforme ilustrado na **Fig.1**. Ao triângulo são acrescentados terminais que representam pontos de conexão com o circuito externo.

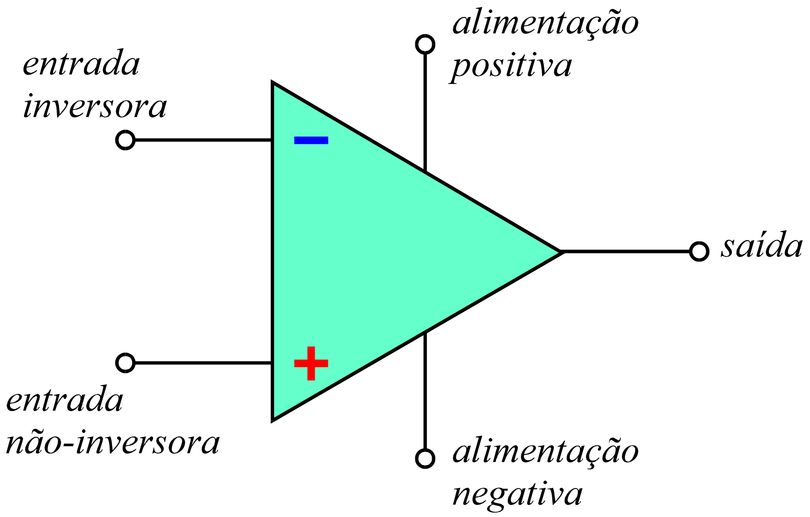


Fig.1 Representação de circuito de um amplificador operacional.

Como mostrado na **Fig.1**, existem fundamentalmente 5 terminais que fazem parte de todos os tipos de amplificadores operacionais:

- Dois terminais para alimentação.
- Um terminal de saída.
- Um terminal de entrada não inversora.
- Um terminal de entrada inversora.

TERMINAIS DE ALIMENTAÇÃO DO *AO*

Devido às suas características de construção, os amplificadores operacionais devem ser alimentados com tensões simétricas. A **Fig.2** ilustra o emprego de uma fonte simétrica para alimentação de um *AO*.

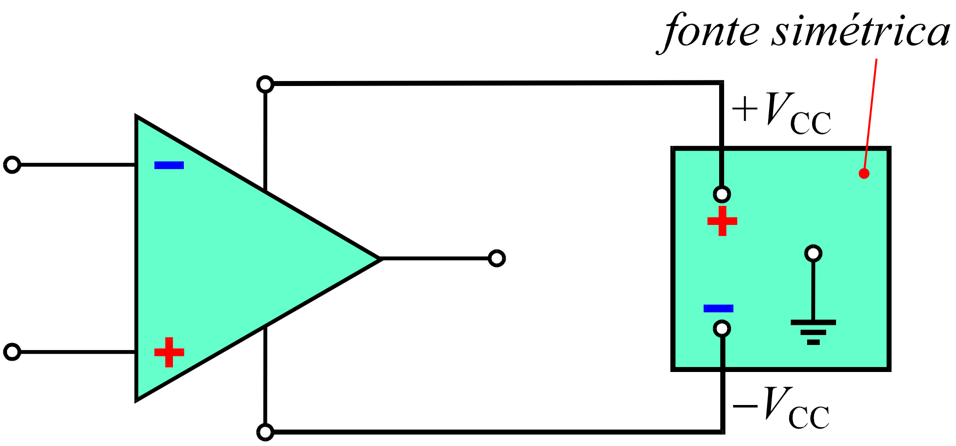


Fig.2 Forma de alimentação de um *AO*.

É importante observar que os *AO*s não são ligados diretamente ao terminal **terra(0V)** da fonte simétrica, pois o circuito compondo o amplificador operacional dispõe internamente desse terminal, como ilustrado na **Fig.3**.

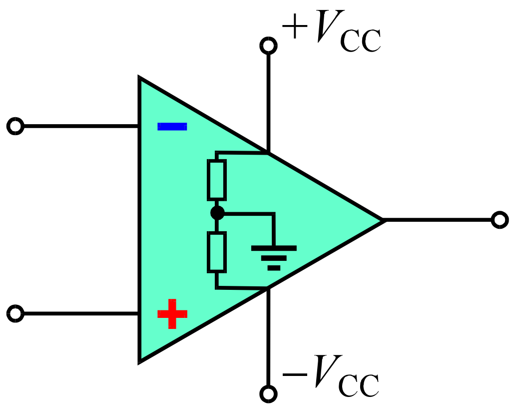


Fig.3 Diagrama da estrutura interna de um *AO*.

Outros componentes ou circuitos que estejam ligados ao *AO* e que necessitem do terminal **terra** podem utilizar aquele terminal diretamente da fonte simétrica, como mostrado no exemplo da **Fig.4**.

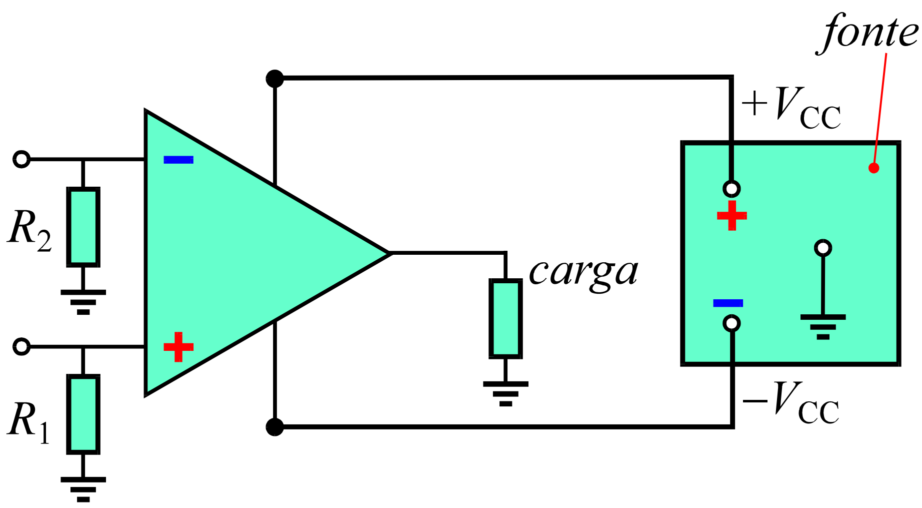


Fig.4 Amplificador operacional conectado a um circuito com fonte simétrica.

TERMINAIS DE ENTRADA DO *AO*

A finalidade básica de um amplificador operacional é realizar a amplificação tanto de tensões contínuas como alternadas. O componente possui dois terminais de entrada, como já indicado na **Fig.1**:

- Um terminal de entrada inversora, indicado pelo sinal (–) no símbolo do *AO*.
- Um terminal de entrada não inversora indicado pelo sinal (+) no símbolo do *AO*.

Para os sinais ou tensões aplicadas na entrada inversora (–) o *AO* se comporta como um amplificador que introduz uma defasagem de 180º no sinal de saída em relação ao sinal de entrada. Esse efeito está ilustrado na **Fig.5** para um sinal aplicado ao terminal inversor.

Para os sinais ou tensões aplicadas na entrada não inversora (+), o *AO* não introduz nenhuma defasagem entre a entrada e a saída, conforme ilustrado na **Fig.6**.

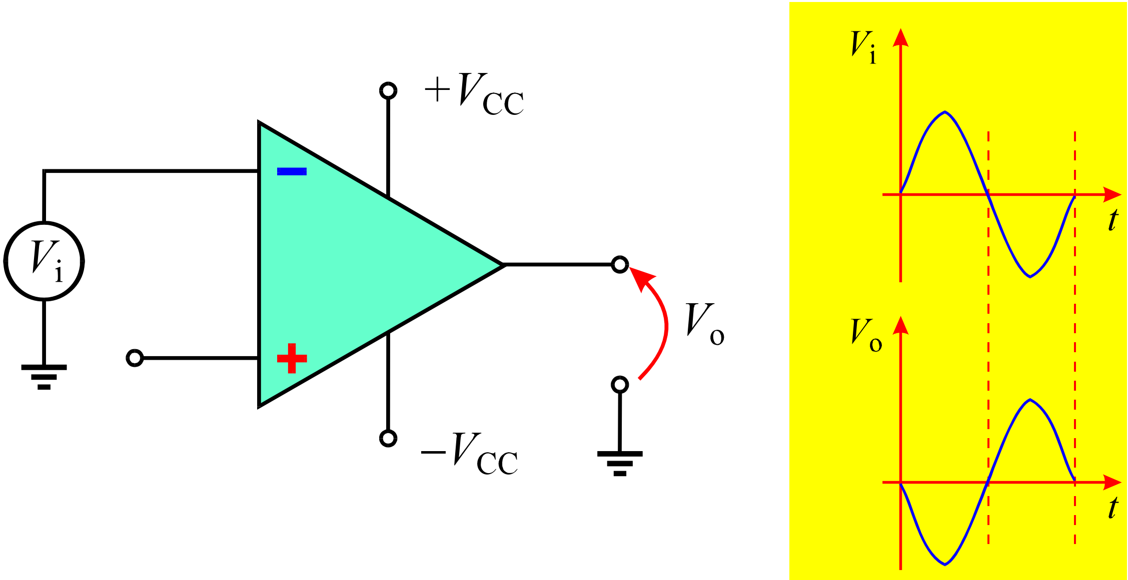


Fig.5 Relação entre os sinais de entrada e saída de um *AO* para um sinal aplicado à entrada inversora do dispositivo.

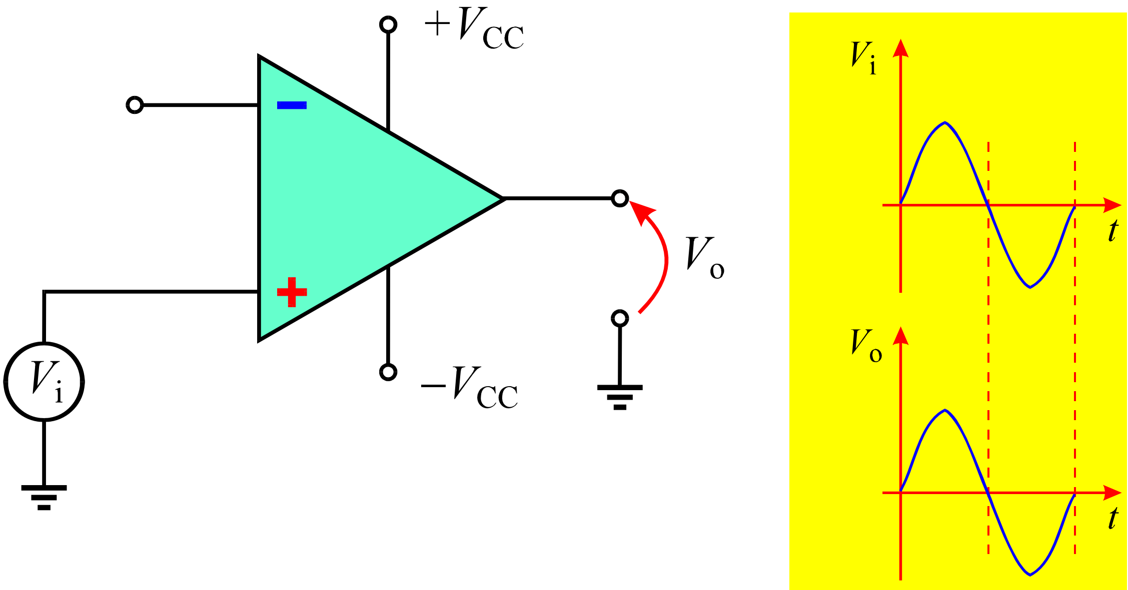


Fig.6 Relação entre os sinais de entrada e saída de um *AO* para um sinal aplicado à entrada não inversora do dispositivo.

CARACTERÍSTICAS DE UM *AO*

As características ou parâmetros de um *AO* são fornecidos no folheto de especificações do fabricante e possibilitam ao usuário determinar, entre os diversos tipos de dispositivos, aquele que se adapta a uma determinada

necessidade. Entre os parâmetros especificados, aqueles que merecem atenção especial são os seguintes:

- Impedância de entrada.
- Impedância de saída.
- Ganho de tensão em malha aberta.
- Tensão *offset* de saída.
- Rejeição de modo comum.
- Banda passante.

As características de um amplificador operacional real podem ser analisadas com base nos parâmetros característicos de um *AO* ideal. Nesse sentido, os fabricantes procuram continuamente desenvolver novos circuitos cujas características se aproximam das ideais. São definidos nas seções seguintes os parâmetros característicos listados anteriormente.

IMPEDÂNCIA DE ENTRADA

A impedância de entrada Z_i de um *AO* é aquela que seria medida entre os terminais de entrada do dispositivo, conforme mostrado na **Fig.7**.

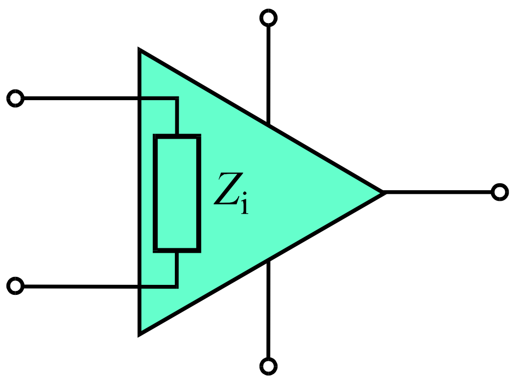


Fig.7 Representação do parâmetro Z_i de um *AO*.

Idealmente o *AO* deveria ter terminais de entrada totalmente isolados, e conseqüentemente, o *AO* ideal deve exibir um impedância de entrada infinita. A aplicação de uma tensão de entrada resultaria em uma corrente injetada nula, pois a condição $Z_i \to \infty$ fornece

$$I_i = \frac{V_i}{Z_i} \to \frac{V_i}{\infty} \to 0$$

Um *AO* real, construído na forma de um circuito integrado tem uma impedância de entrada da ordem de vários megahoms. Esse alto valor permite, em muitos casos, utilizar o valor ideal $Z_i \rightarrow \infty$ para o amplificador operacional real, e nessa aproximação pode-se considerar que a corrente injetada em um *AO* real é praticamente nula.

IMPEDÂNCIA DE SAÍDA

A impedância de saída Z_o de um *AO* é aquela que seria medida entre o terminal de saída e o terra do circuito. Conforme ilustrado na **Fig.8**, o modelo de circuito para a saída de um *AO* corresponde a uma fonte de tensão ideal em série com um resistor de resistência Z_o.

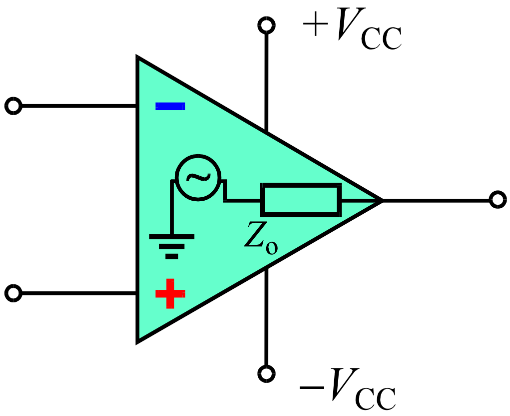


Fig.8 Representação do parâmetro Z_o de um *AO*.

Idealmente um amplificador operacional deve exibir $Z_o = 0\ \Omega$ de forma a ter uma saída que se comporte como uma fonte de tensão ideal para a carga, ou seja, uma fonte com resistência interna nula, como indicado na **Fig.9**.

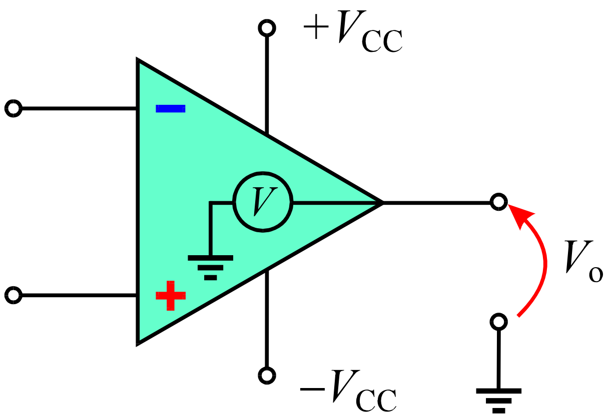


Fig.9 Modelo de circuito para a saída de um *AO* ideal.

Com impedância de saída nula, a tensão de saída de um *AO* ideal depende apenas do valor do sinal de entrada e do ganho do dispositivo, sendo independente da corrente solicitada pela carga.

Em um amplificador operacional real a impedância de saída pode estar situada na faixa 10 Ω < Z_o < 1 kΩ. Através de um circuito externo a impedância de saída de um *AO* pode, em alguns casos, ser reduzida a valores Z_o < 1Ω.

Um valor não nulo para a impedância de saída de um *AO* real é um fator indesejável pois a tensão de saída tende a diminuir com o aumento da corrente solicitada pela carga. Isso pode ser concluído com base na **Fig.10**, que indica a existência de uma tensão de carga

$$V_o = V - I_o Z_o < V$$

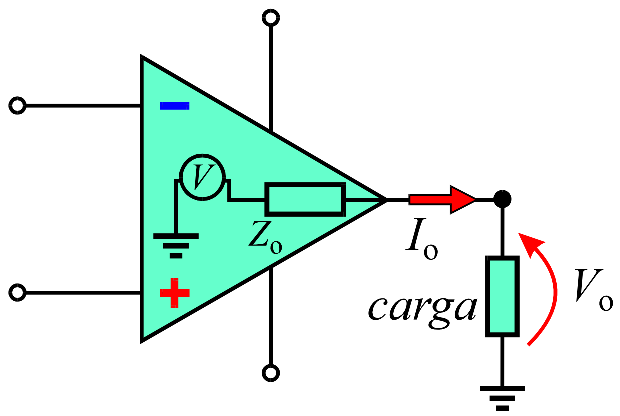


Fig.10 Parâmetros elétricos de um *AO* real com saída conectada à carga.

Em resumo, a tensão de saída V_o de um *AO* real depende dos seguintes fatores:

- Tensão de entrada.
- Ganho do *AO*.
- Corrente solicitada pela carga.

GANHO DE TENSÃO DIFERENCIAL

O sinal a ser amplificado por um *AO* pode ser aplicado de três maneiras:

- Entre a entrada inversora (–) e o terminal terra.
- Entre a entrada não inversora (+) e o terminal terra.
- Entre as entradas (+) e (–).

Quando o sinal é aplicado entre os dois terminais de entrada, na forma mostrada na **Fig.11**, o *AO* atua como **amplificador diferencial**. Existem dois tipos de ganho associados ao amplificador diferencial:

- Ganho em malha aberta.
- Ganho em malha fechada.

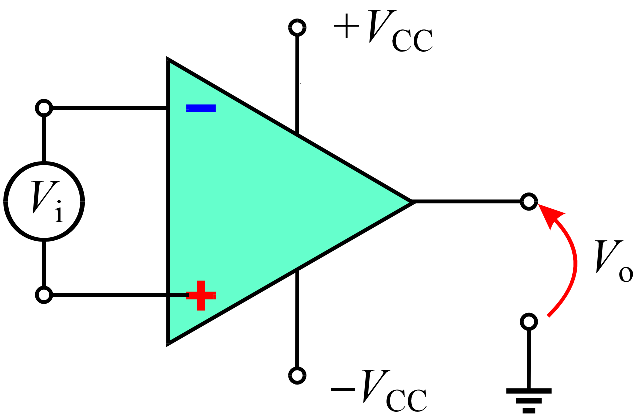


Fig.11 *AO* configurado como amplificador diferencial.

Ganho em malha aberta: Esse parâmetro é definido como sendo o ganho do amplificador diferencial quando não há ligação entre o terminal de saída e um dos terminais de entrada, conforme mostrado na **Fig.11**. O ganho em malha aberta depende apenas das características intrínsecas do *AO*.

Ganho em malha fechada:

Esse parâmetro é definido como sendo o ganho do amplificador diferencial quando é feita uma realimentação externa, conectando o terminal de saída a um dos terminais de entrada, conforme mostrado na **Fig.12**. O ganho em malha fechada depende, além das propriedades intrínsecas do *AO*, dos parâmetros elétricos dos elementos de circuito utilizados na realimentação.

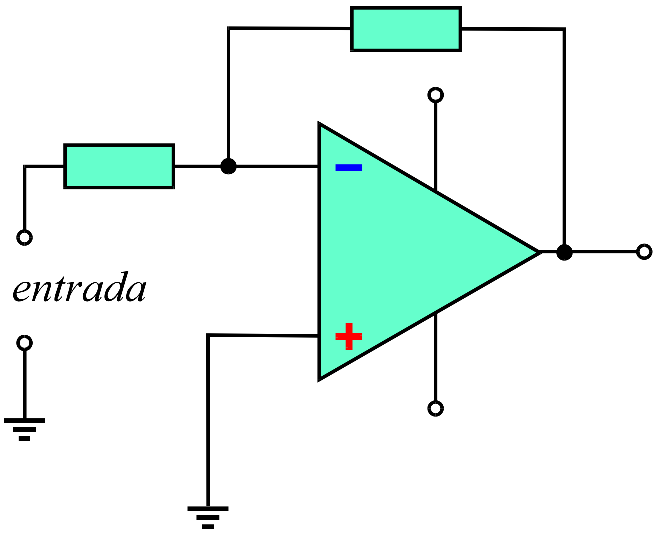


Fig.12 *AO* configurado com elementos de realimentação.

Os folhetos de especificações do fabricante fornecem o ganho diferencial em malha aberta (A_d).

Idealmente o ganho diferencial em malha aberta de um amplificador operacional deveria ser infinito, ou seja, $A_d \rightarrow \infty$. No entanto, o componente real apresenta um ganho que pode variar de 10^3 a 10^6.

O ganho de um *AO* pode ser reduzido a um valor específico com o emprego de um circuito de realimentação, do tipo mostrado na **Fig.12**. Essa é uma das características mais importantes do amplificador operacional, pois o ganho em malha fechada torna-se dependente apenas dos parâmetros elétricos associados aos componentes do circuito de realimentação.

TENSÃO *OFFSET* DE SAÍDA

Um amplificador operacional ideal deveria exibir tensão de saída nula, se ambos os terminais de entrada estivessem aterrados, conforme ilustrado na **Fig.13**. No entanto, o componente real exibe tensão de saída não nula mesmo com os terminais de entrada aterrados.

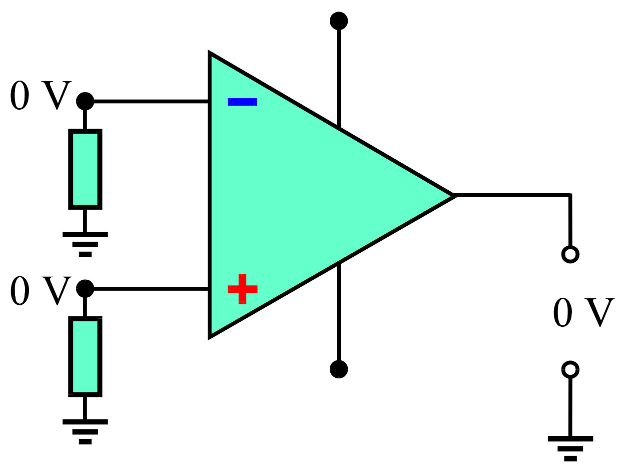


Fig.13 *AO* ideal com os dois terminais de entrada aterrados.

Qualquer valor de tensão que surge na saída de um *AO* com terminais de entrada aterrados é denominado de **tensão *offset* de saída**, V_{OS}. Em geral, a tensão *offset* de um *AO* pode chegar a alguns milivolts.

Um dos terminais do *AO*, denominado de *offset null*, pode ser conectado a um circuito externo, de forma a permitir o ajuste da tensão de saída até um valor

nulo, quando as entradas estiverem aterradas. Esse terminal adicional está mostrado na representação de circuito do *AO* da **Fig.14**.

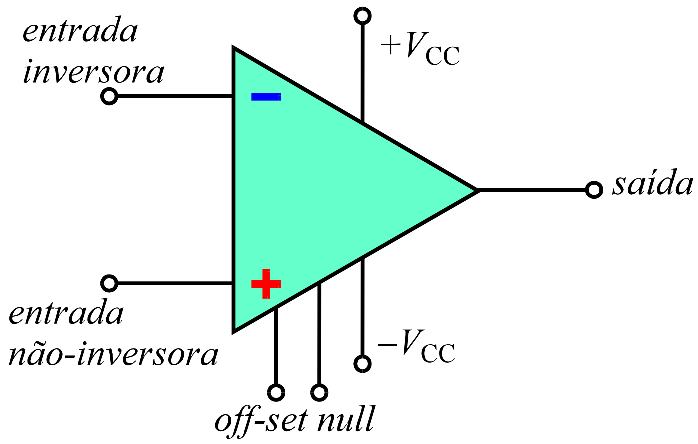


Fig.14 Representação de circuito de um *AO* com a inclusão do terminal *offset null*.

REJEIÇÃO DE MODO COMUM

Quando as duas entradas de um *AO* recebem sinal, o dispositivo deveria atuar idealmente como amplificador diferencial, isto é, amplificando a diferença entre as duas tensões. Com base na **Fig.15**, considerando as tensões V_1 e V_2 aplicadas aos terminais (+) e (–), respectivamente, a tensão de saída do *AO* seria dada por

$$V_o = A_d V_d \quad (1)$$

com

$$V_d = V_1 - V_2 \quad (2)$$

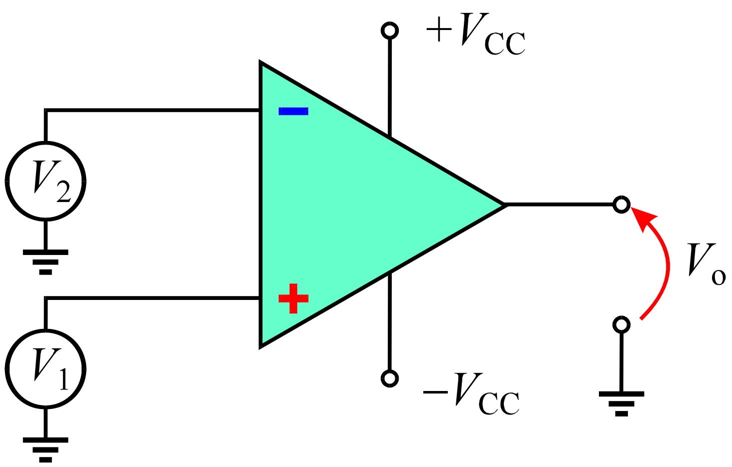


Fig.15 Tensões de entrada e saída em um amplificador operacional.

A **Eq.(1)** mostra que idealmente, se V_d = 0, V_o = 0, ou seja, tensões idênticas aplicadas aos terminais de entrada produziriam uma tensão nula na saída.

De forma precisa, em um amplificador operacional real, a tensão de saída não depende apenas da diferença de potencial entre os terminais de entrada, mas também do valor médio das tensões aplicadas a esses terminais. Conseqüentemente, a relação entre entrada e saída em um *AO* real, não pode ser representada rigorosamente pela **Eq.(1)**.

Para precisar melhor a relação entre entrada e saída de um *AO* real, define-se a tensão média de entrada pela relação

$$V_c = \frac{1}{2}(V_1 + V_2) \qquad (3)$$

Com a definição de tensão média dada pela **Eq.(3)**, a relação entre entrada e saída para um *AO* real pode ser generalizada na forma

$$V_o = A_d V_d + A_c V_c \qquad (4)$$

Das **Eqs.(2)** e **(3)**, observa-se que a condição V_1 = V_2, equivalente à aplicação de uma tensão comum a ambos os terminais, fornece

$$V_d = V_1 - V_2 = 0 \text{ e } V_c = \frac{1}{2}(V_1 + V_2) = \frac{1}{2} 2V_1 = V_1$$

e a **Eq.(4)** fornece

$$V_o = A_d V_d + A_c V_c = A_d \times 0 + A_c V_1$$

$$\boxed{\Rightarrow V_o = A_c V_1}$$

Ou seja, aparece na saída uma tensão relacionada à amplificação da tensão média de entrada que no presente exemplo, corresponde à tensão comum a ambas as entradas. Por essa razão, o parâmetro A_c é definido como o **ganho de modo comum** do amplificador.

Um bom amplificador operacional, com características próximas àquelas de um *AO* ideal, deve exibir um ganho de modo comum tão pequeno quanto possível, de forma que a tensão de saída seja dependente apenas da diferença de potencial entre os terminais de entrada.

Um parâmetro denominado de **razão de rejeição de modo comum**, abreviado pela sigla ***CMRR***, é fornecido no folheto de especificações do fabricante, para exprimir quão pequeno é o ganho de modo comum em comparação ao ganho diferencial. Aquele parâmetro é geralmente expresso em dB pela relação

$$CMRR = 20\log\left(\frac{A_d}{A_c}\right) \tag{5}$$

Da **Eq.(5)** nota-se que um *AO* ideal teria um ganho de modo comum A_c=0, de forma que

$$CMRR = 20\log\left(\frac{A_d}{A_c}\right) = 20\log\left(\frac{A_d}{0}\right) \rightarrow \infty \text{, para o } AO \text{ ideal}$$

Para o *AO* real o ganho de modo comum deve ser tão pequeno quanto possível, o que equivale a um valor alto do parâmetro *CMRR*. Os exemplos a seguir ilustram a relação entre tensões em um *AO*.

Exemplo 1: O *AO* mostrado na **Fig.16** tem um ganho diferencial de 40 dB. Admitindo que a razão de rejeição de modo comum seja infinita, determinar a tensão V_o nos seguintes casos:

a) V_1 = 1,1 V e V_2 = 1,0 V.

b) V_1 = 6,1 V e V_2 = 6,0 V.

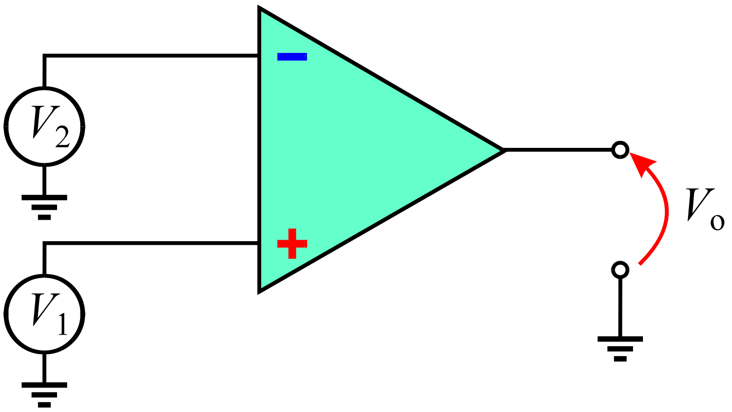


Fig.16 Configuração de circuito utilizada no **Exemplo 1**.

Como o ganho diferencial está expresso em dB, tem-se que

$$20\log(A_d) = 40 \Rightarrow \log(A_d) = 2$$

$$\boxed{\Rightarrow A_d = 10^2 = 100}$$

a) Com V_1 = 1,1 V e V_2 = 1,0 V, e notando que a razão de rejeição de modo comum é infinita, a **Eq.(2)** fornece

$$V_d = V_1 - V_2 = 1{,}1 - 1 = 0{,}1 \text{ V}$$

e a **Eq.(1)** fornece

$$V_o = A_d V_d = 100 \times 0{,}1$$

$$\boxed{\Rightarrow V_o = 10 \text{ V}}$$

b) Com V_1 = 6,1 V e V_2 = 6,0 V, a diferença de potencial na entrada permanece a mesma, ou seja,

$$V_d = V_1 - V_2 = 6{,}1 - 6 = 0{,}1 \text{ V}$$

e a **Eq.(1)** fornece para a tensão de saída, o mesmo valor obtido no item (a)

$$\boxed{\Rightarrow V_o = 10 \text{ V}}$$

Exemplo 2: Repetir o **Exemplo 1** admitindo que o *AO* da **Fig.16** tenha uma razão de rejeição de modo comum de 80 dB.

Neste exemplo, a determinação da tensão de saída requer a obtenção do ganho de modo comum. Este último é obtido a partir do parâmetro *CMRR* com o uso da **Eq.(5)**, reproduzida a seguir:

$$CMRR = 20\log\left(\frac{A_d}{A_c}\right)$$

Com A_d = 100 e *CMRR* = 80 dB, tem-se

$$80 = 20\log\left(\frac{100}{A_c}\right) \Rightarrow \log\left(\frac{100}{A_c}\right) = 4 \Rightarrow \frac{100}{A_c} = 10^4 = 10.000$$

$$\Rightarrow A_c = \frac{100}{10.000} = 0{,}01$$

a) Com V_1 = 1,1 V e V_2 = 1,0 V, a **Eq.(2)** fornece

$$V_d = V_1 - V_2 = 1{,}1 - 1 = 0{,}1 \text{ V}$$

e da **Eq.(3)**, obtém-se o valor médio de tensão de entrada

$$V_c = \frac{1}{2}(1 + 1{,}1) = \frac{2{,}1}{2} = 1{,}05 \text{ V}$$

Com A_d = 100 e A_c = 0,01, a **Eq.(4)** fornece

$$V_o = A_d V_d + A_c V_c = 100 \times 0{,}1 + 0{,}01 \times 1{,}05 = 10 + 0{,}0105$$

$$\Rightarrow V_o = 10{,}0105 \approx 10{,}01 \text{ V}$$

b) Com V_1 = 6,1 V e V_2 = 6,0, repetindo-se as etapas do item (a), vem

$$V_d = V_1 - V_2 = 6{,}1 - 6 = 0{,}1 \text{ V}$$

$$V_c = \frac{1}{2}(6 + 6{,}1) = \frac{12{,}1}{2} = 6{,}05 \text{ V}$$

Com A_d = 100 e A_c = 0,01, a **Eq.(4)** fornece

$$V_o = A_d V_d + A_c V_c = 100 \times 0{,}1 + 0{,}01 \times 6{,}05 = 10 + 0{,}0605$$

$$\Rightarrow V_o = 10{,}0605 \approx 10{,}06 \text{ V}$$

BANDA PASSANTE

O ganho diferencial A_d de um *AO* pode atingir valores da ordem de 200.000. Esse ganho, entretanto, tende a diminuir com o aumento da freqüência do sinal a ser amplificado. Esse comportamento pode ser observado na **Fig. 17**, que mostra a dependência em freqüência do ganho diferencial de um amplificador operacional típico em escala logarítmica.

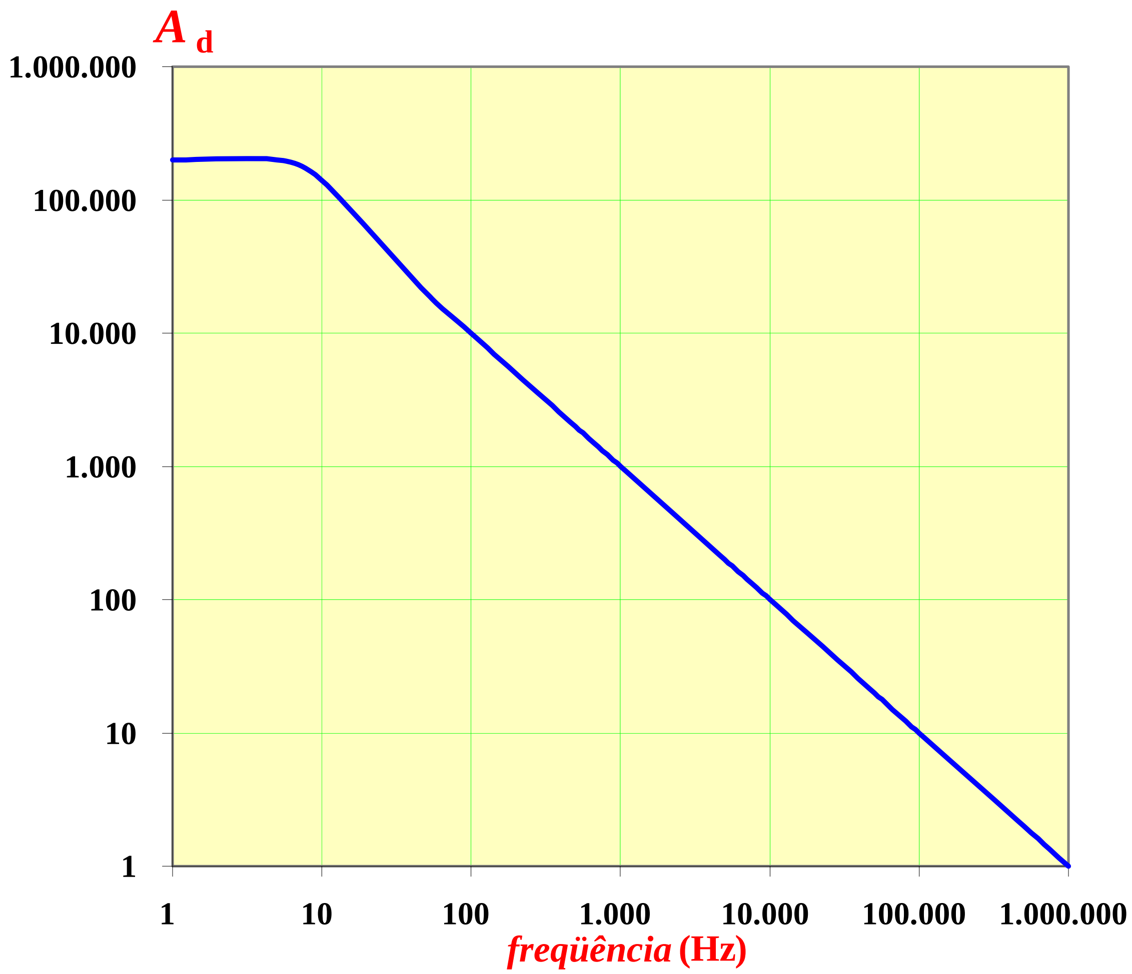


Fig.17 Dependência em freqüência do ganho diferencial de um *AO*.

Um exame do gráfico mostrado na **Fig.17** indica que para freqüências de sinal inferiores a cerca de 5 Hz, o ganho permanece praticamente constante, no caso presente, próximo de 200.000, ou equivalentemente, 106 dB. A partir dessa freqüência o ganho tende a decrescer sensivelmente atingindo um valor unitário a uma freqüência de cerca de 1 MHz.

A **banda passante** do amplificador operacional é definida como a faixa de freqüências de sinal em que o ganho diferencial do amplificador é superior a cerca de 70% do ganho máximo.

A **Fig.18** mostra em detalhes a região de baixas freqüências do gráfico da **Fig.17**. Como pode ser aí observado, na freqüência de 10 Hz, o ganho diferencial diminui para cerca de 70% do valor máximo, ou seja, 140.000. Esse valor corresponde a um ganho de 103 dB, que é 3 dB inferior ao ganho máximo. Conclui-se portanto que a banda passante do *AO* em questão é de 10Hz.

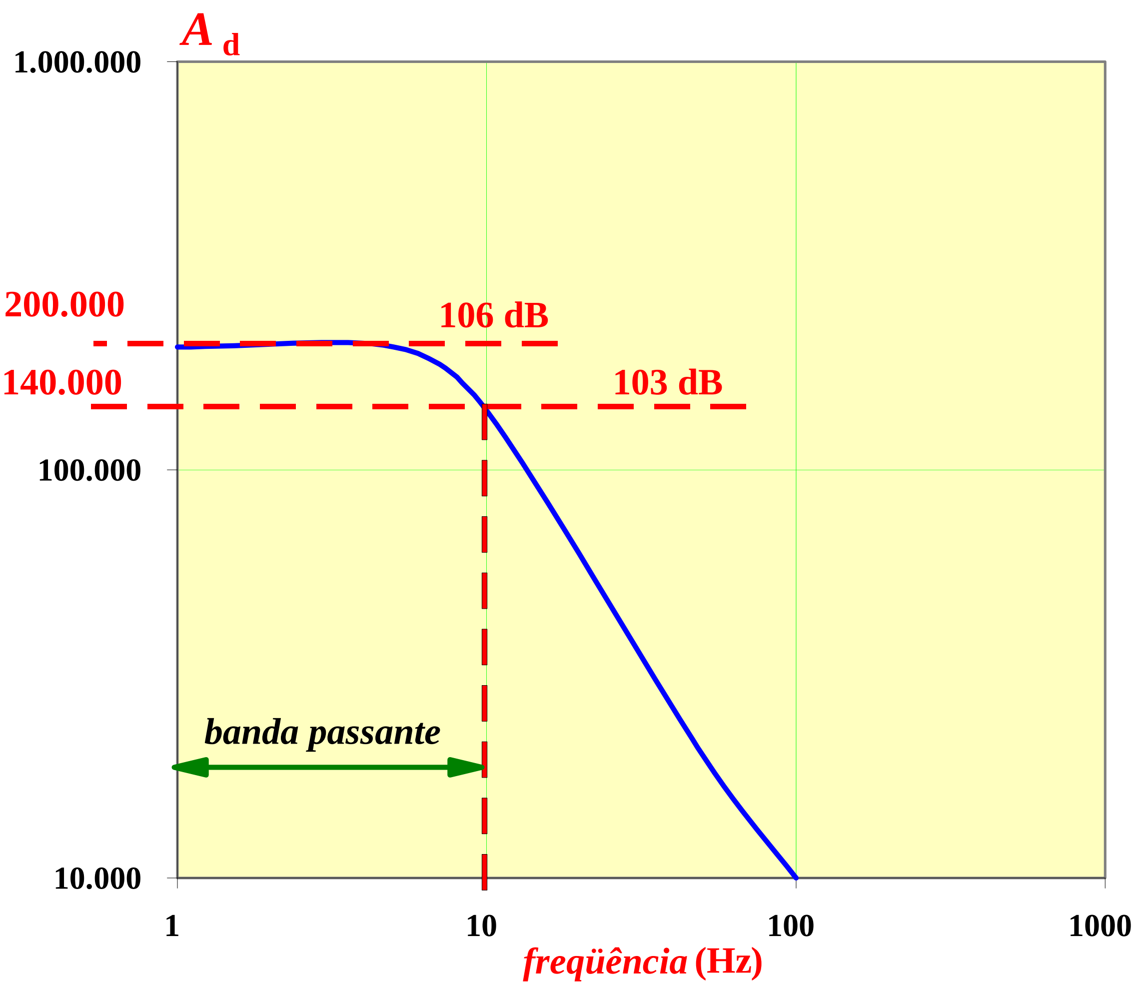


Fig.18 Região de baixas freqüências do gráfico da **Fig.17**.

AMPLIFICADOR OPERACIONAL 741

Um amplificador operacional freqüentemente utilizado em circuitos eletrônicos é o 741, devido ao seu baixo custo e relativamente bom desempenho. O campo de aplicações deste *AO* é tão extenso que um grande número de fabricantes de circuitos integrados produz amplificadores operacionais com características e designações praticamente idênticas, como por exemplo, MA741, LM741, MC741, SN72741, AD741 etc.

A **Tabela 1** resume os valores típicos dos parâmetros do *AO* 741 juntamente com os valores correspondentes a um *AO* ideal. Os parâmetros aí listados mostram que o 741 tem características próximas àquelas de um amplificador operacional ideal.

Tabela 1 Parâmetros típicos do *AO* 741 e valores correspondentes de um *AO* ideal.

Parâmetro	*AO* ideal	741
Z_i	∞	2 MΩ
Z_o	0 Ω	75Ω
A_d	∞	106dB
CMRR	∞	90dB

O folheto de especificações do fabricante também fornece uma série de informações adicionais, que permitem estabelecer o desempenho do componente e valores máximos admitidos para as grandezas elétricas de alimentação e entrada, bem como temperatura de operação do componente. A **Tabela 2** lista os valores máximos permitidos para os componentes da série AD741(J, K, L ou S), fabricados pela *Analog Devices*.

Tabela 2 Valores máximos permitidos para os componentes da série AD741 (J, K, L ou S).

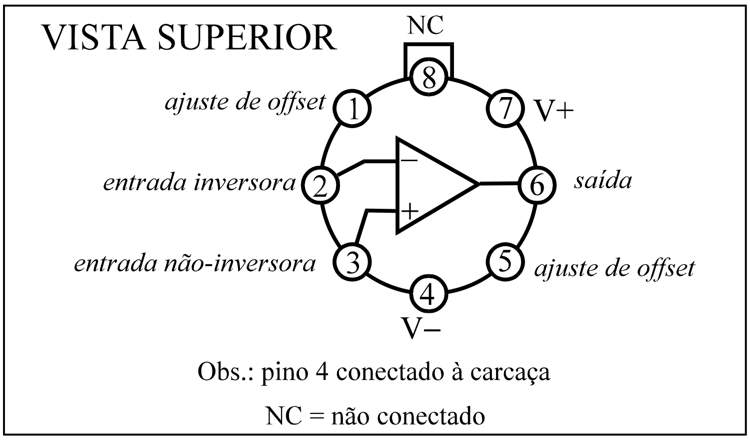
Parâmetro	Valor máximo permitido
Tensão de alimentação	± 22 V
Dissipação interna de potência	500 mW
Tensão diferencial de entrada[1]	± 30 V
Tensão de entrada[2]	± 15 V
Faixa de temperatura durante armazenagem	– 65 °C a 150 °C
Temperatura durante soldagem (até 60 seg)	+ 300 °C
Duração de curto-circuito na saída	Indefinido
Temperatura de operação	70 °C

[1] Máxima diferença de potencial entre terminais de entrada.
[2] Máxima tensão que pode ser aplicada entre um dos terminais de entrada e o terra, não devendo exceder a tensão de alimentação.

AJUSTE DE *OFFSET* DO *AO* 741

A **Fig.19** mostra a disposição dos terminais do AD741 nos encapsulamentos circular e DIL. Como pode ser aí observado, existem dois terminais que são utilizados para o ajuste da tensão *offset* na saída.

Circular



DIL

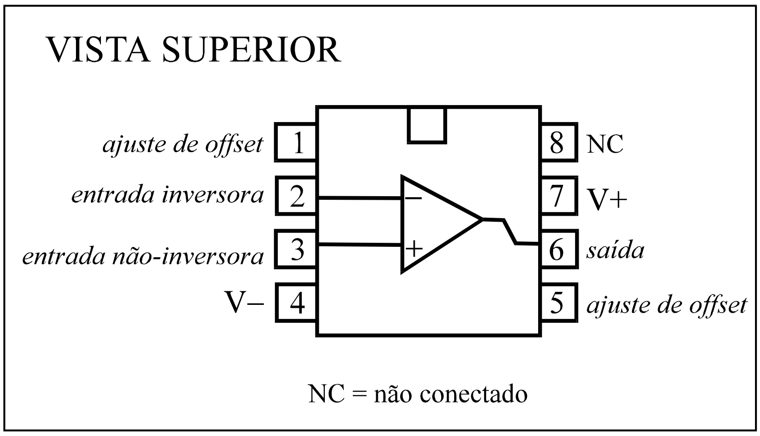


Fig.19 Disposição dos terminais do AD741 para dois tipos de encapsulamento.

O procedimento recomendado pelo fabricante para a efetuação do ajuste de *offset* é mostrado na **Fig.20**. A técnica utiliza um potenciômetro de 10kΩ conectando ambos os terminais, com o terminal ajustável do potenciômetro conectado diretamente ao terminal $-V_{CC}$ da fonte de alimentação. Dessa forma, aterrando-se os terminais de entrada, ajusta-se o potenciômetro até o ponto em que a tensão de saída se reduz a um valor nulo.

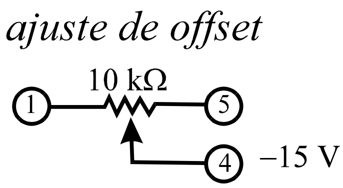


Fig.20 Procedimento de ajuste da tensão *offset* do AD741.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Desenhe a representação de circuito de um *AO* e identifique os seus terminais.

2. Qual é a relação de fase entre o sinal de saída e o sinal de entrada em um *AO* nos seguintes casos:

   (a) sinal aplicado ao terminal não inversor.

   (b) sinal aplicado ao terminal inversor.

3. Que parâmetros são utilizados para caracterizar um *AO*?

4. Descreva o significado dos parâmetros obtidos na questão anterior.

5. Como é definida a banda passante de um *AO*?

6. Repetir o **Exemplo 1** admitindo que o *AO* tenha um ganho diferencial de 30 dB.

7. Repetir o **Exemplo 2** admitindo que o *AO* tenha um ganho diferencial de 30 dB e uma razão de rejeição de modo comum de 40 dB.

BIBLIOGRAFIA

LANDO, Roberto Antônio & ALVES, Sérgio Rios, Amplificador operacional, São Paulo, Érica, 1983.

MALVINO, Albert Paul, Eletrônica, São Paulo, Mc Graw Hill do Brasil, 1986.

MILLMAN, Jacob & HALKIAS, Christos C. Eletrônica: dispositivos e circuitos, Vol.2, Mc Graw- Hill do Brasil, São Paulo, 1981.

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Introdução

O amplificador operacional foi introduzido no fascículo anterior, onde foram apresentadas as características fundamentais desse componente e ajustes necessários para o seu correto funcionamento.

Neste fascículo, são apresentados exemplos de circuitos que fazem uso do amplificador operacional. Alguns dos circuitos aqui mostrados são circuitos lineares tipicamente utilizados na indústria e no lazer.

Ao final deste fascículo o leitor deverá estar apto a identificar os circuitos lineares e conhecer os seus princípios básicos de funcionamento.

Para a boa compreensão do conteúdo e desenvolvimento das atividades contidas neste fascículo, o leitor deverá estar familiarizado com os conceitos relativos a:

- Amplificador operacional.

Circuitos lineares com amplificador operacional

O ganho de um *AO* em malha aberta, ou seja, sem realimentação, é altíssimo, podendo atingir fatores acima de 10.000. No entanto, o ganho só permanece constante entre limites bem definidos da tensão diferencial de entrada, conforme discutido a seguir.

CURVA DE TRANSFERÊNCIA DE UM AMPLIFICADOR OPERACIONAL

Assumindo inicialmente a situação ilustrada na **Fig.1**, em que a tensão diferencial de entrada $\Delta V_i = V_A - V_B$ é positiva e crescente, a tensão de saída V_o cresce na mesma proporção, de acordo com a relação

$$V_o = A_d \Delta V_i \tag{1}$$

onde A_d é o ganho do amplificador.

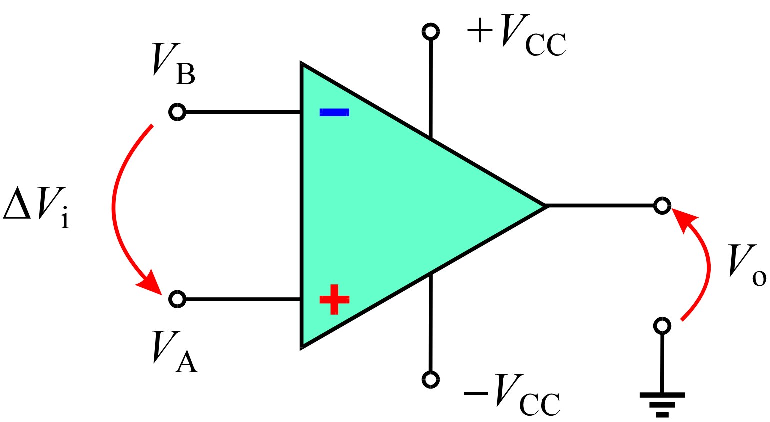


Fig.1 Amplificador operacional submetido a uma tensão diferencial positiva.

É de se esperar, no entanto, que a tensão de saída, quando positiva, não supere o valor $+V_{CC}$ imposto externamente pela fonte de alimentação. Isso implica que a **Eq.(1)** permanece válida até o limite de tensão diferencial de entrada $\Delta V_{i,máx}$, tal que a tensão de saída se aproxima do valor $+V_{CC}$, conforme ilustrado no gráfico da **Fig.2**.

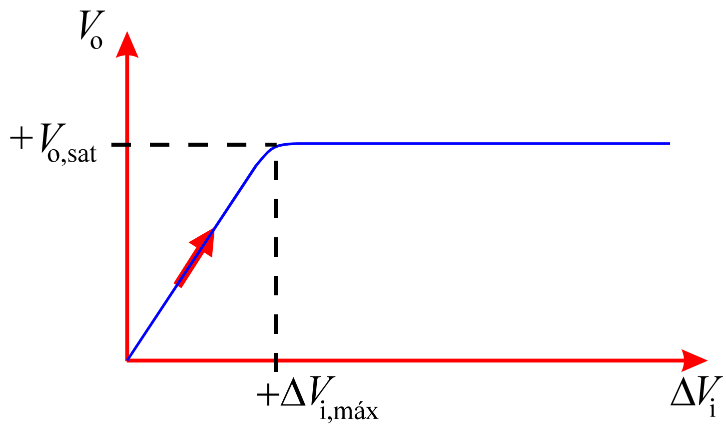


Fig.2 Variação da tensão de saída devido à aplicação de uma tensão diferencial positiva e crescente na entrada do amplificador operacional.

Como se pode observar na **Fig.2**, a partir da condição

$$\Delta V_i > \Delta V_{i,máx}$$

a tensão de saída **satura**, assumindo um valor $V_{o,sat}$. A partir dessa condição, nenhum aumento na tensão ΔV_i produz aumento significativo na tensão de saída, e esta permanece praticamente constante ou **saturada** no valor $V_{o,sat}$. O valor $V_{o,sat}$ é geralmente um pouco inferior ao valor V_{CC}.

De forma semelhante, aplicando-se uma tensão diferencial ΔV_i negativa e decrescente na entrada do *AO*, a tensão de saída V_o varia na mesma proporção, isto é, torna-se negativa e decrescente, como expresso pela **Eq.(1)**. Essa variação ocorre até o limite em que a tensão de entrada atinge o valor $(-\Delta V_{i,máx})$.

A partir da condição

$$\Delta V_i < -\Delta V_{i,max}$$

a tensão de saída **satura** no valor negativo $-V_{o,sat}$, e nenhum decréscimo adicional na tensão de entrada produz variação significante na tensão de saída, como mostrado na **Fig.3**.

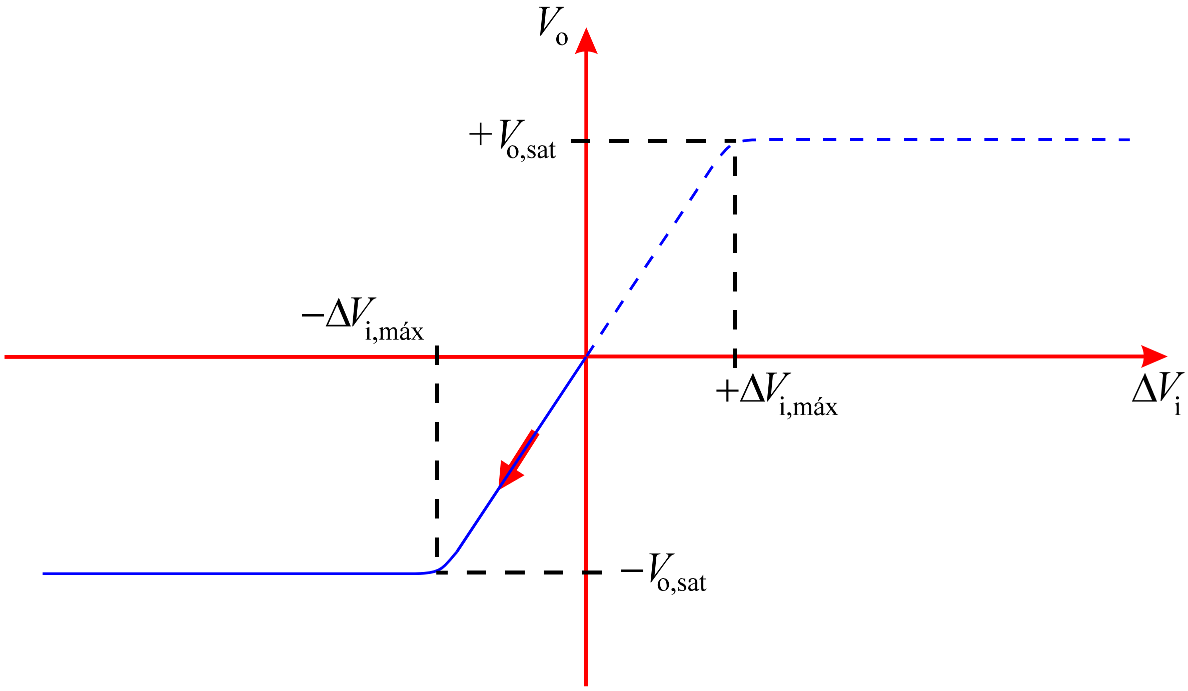


Fig.3 Variação da tensão de saída devido à aplicação de uma tensão diferencial negativa e decrescente na entrada do amplificador operacional.

A **Fig.4** mostra a **curva de transferência** de um amplificador operacional, onde podem ser identificadas três regiões de operação:

- Região linear.
- Região de saturação positiva.
- Região de saturação negativa.

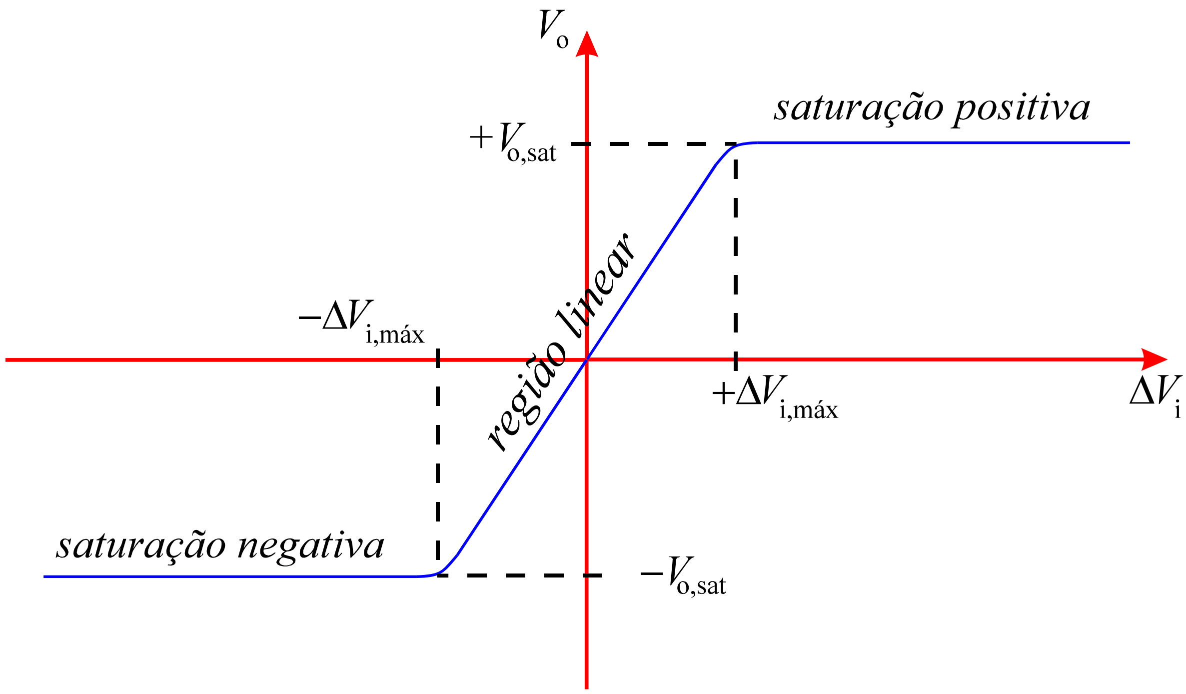


Fig.4 Curva de transferência de um *AO*.

Região linear: Essa região corresponde à porção da curva em que o amplificador opera com um ganho praticamente constante, sendo definida a partir da condição

$$-\Delta V_{i,máx} \leq \Delta V_i \leq +\Delta V_{i,máx}$$

Na região linear, para o caso de um *AO* operando sem realimentação, a tensão de saída pode ser obtida a partir da tensão diferencial de entrada pela relação linear

$$V_o = A_d \Delta V_i$$

onde A_d é o ganho em malha aberta do *AO*.

Região de saturação positiva: Essa corresponde à porção da curva em que a tensão de saída é positiva e constante, sendo independente da tensão diferencial de entrada. A região de saturação positiva ocorre na condição

$$\Delta V_i > +\Delta V_{i,máx}$$

e a tensão de saída é dada por

$$V_o = +V_{o,sat}$$

Região de saturação negativa: Essa região corresponde à porção da curva em que a tensão de saída é negativa e constante, sendo também independente da tensão diferencial de entrada. A região de saturação negativa ocorre na condição

$$\Delta V_i < -\Delta V_{i,máx}$$

e a tensão de saída é dada por

$$V_o = -V_{o,sat}$$

É importante observar que quanto maior for o ganho em malha aberta de um *AO*, menor será a largura da região linear. Isso ocorre porque um alto ganho em malha aberta implica uma maior declividade da curva de transferência na região linear, conforme ilustrado na **Fig.5**.

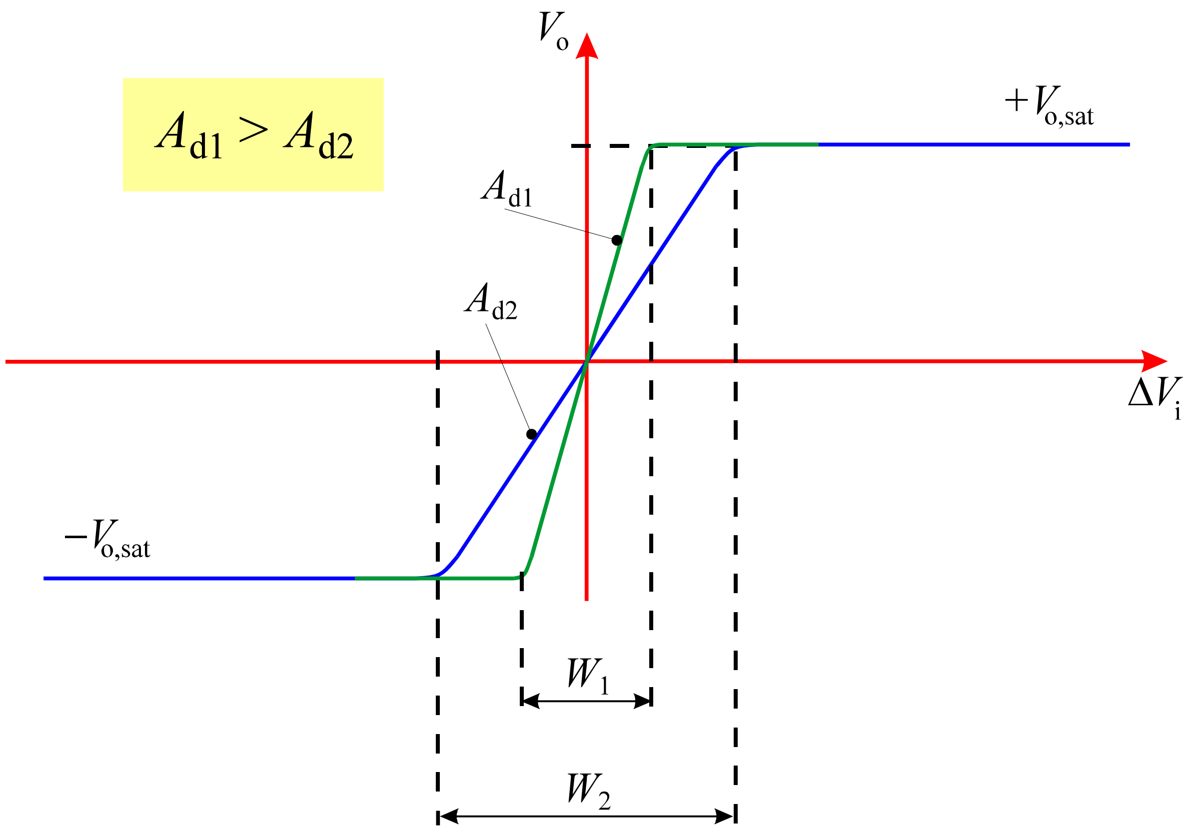


Fig.5 Curvas de transferência de *AO*s de ganhos distintos.

Como pode ser observado na **Fig.5**, as duas curvas se referem a amplificadores operacionais com ganhos em malha aberta A_{d1} e A_{d2}, com $A_{d1} > A_{d2}$. Em geral os valores de tensão de saturação permanecem praticamente invariáveis para tipos distintos de amplificadores operacionais, uma vez que as tensões de alimentação são tipicamente ± 15 V. Dessa forma, as larguras das regiões lineares, representadas na **Fig.5** pelos parâmetros W_1 e W_2, obedecem à condição $W_1 < W_2$.

Com base na **Fig.5**, pode concluir-se que *AO*s operando em níveis idênticos de tensão de alimentação, exibem ganhos e larguras das respectivas regiões lineares obedecendo à condição

$$A_{d1}W_1 \approx A_{d2}\mathrm{W}_2 \approx \text{constante} \qquad (2)$$

ALARGAMENTO DA REGIÃO LINEAR DE UM AMPLIFICADOR OPERACIONAL

A operação em condições normais de um amplificador operacional é usualmente feita na região linear, pois é nessa região que a tensão de saída pode ser controlada pela tensão aplicada à entrada do componente.

Como discutido na seção anterior, um alto ganho em malha aberta implica uma região linear de largura estreita, da ordem de alguns milivolts na maioria dos casos.

A **Fig.6** mostra a curva de transferência típica de um *AO* com ganho em malha aberta A_d = 10.000, que exibe uma região linear de largura W=2×1,3=2,6 mV. Como pode ser aí observado, um *AO* operando em malha aberta estaria limitado a aceitar sinais de entrada de poucos milivolts.

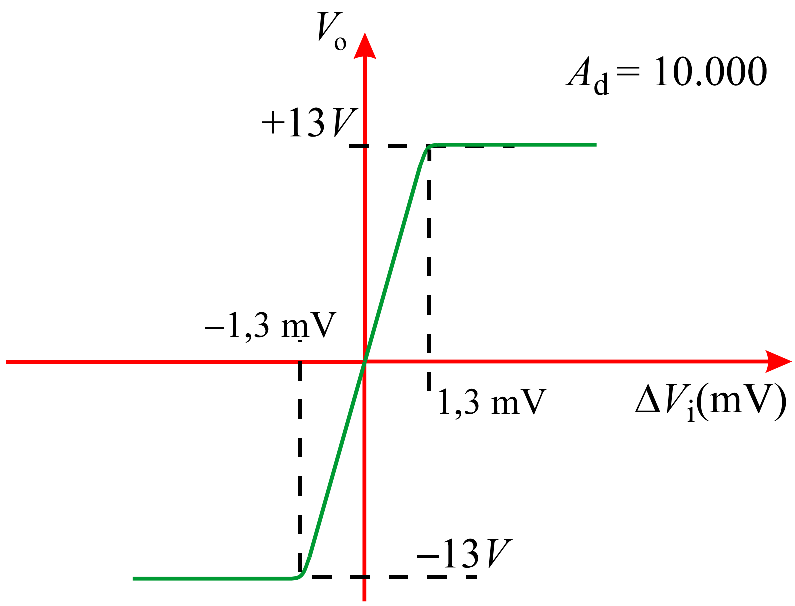


Fig.6 Curva de transferência de um *AO* típico.

Como mostrado anteriormente na **Eq.(2),** o produto A_d×W de um *AO* é aproximadamente constante. Aquela expressão sugere que a largura da região de operação linear de um *AO* pode ser ampliada através da redução do ganho do dispositivo.

Como o amplificador operacional exibe um ganho em malha aberta bem definido, o fator de amplificação só pode ser alterado fazendo-se uma realimentação externa entre os terminais de saída e de entrada do amplificador.

A técnica de **realimentação negativa** produz a redução de ganho desejada e consiste em retornar uma parte do sinal de saída para a entrada **inversora** do amplificador, através de um circuito externo.

A **Fig.7** mostra um *AO* submetido a uma realimentação negativa com o uso de dois resistores externos que formam um divisor de tensão.

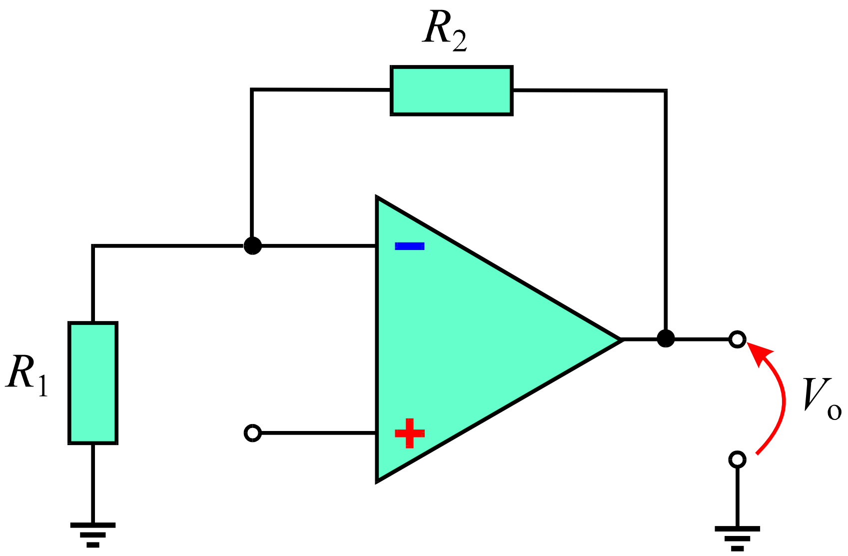


Fig.7 Amplificador operacional sujeito à realimentação negativa por intermédio de um divisor de tensão.

Exemplo 1: Considere um *AO* com ganho em malha aberta A_d=10.000 e tensão de saturação $V_{o,sat}$ = 13 V. Como mostrado na **Fig.6**, a largura da região linear desse *AO* é W = 2,6 mV. Admitindo que o *AO* esteja agora configurado com a realimentação negativa mostrada na **Fig.8** e que esta produza uma amplificação de 100 na tensão V_i, determinar a largura da região linear nessa nova configuração.

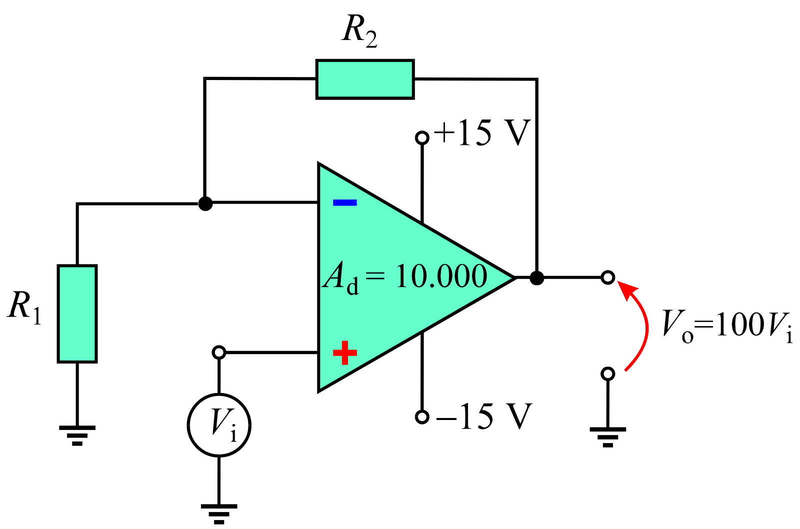


Fig.8 Amplificador operacional com realimentação negativa para o **Exemplo 1**.

Neste exemplo, admite-se que a realimentação negativa produz uma relação entre as tensões de entrada e saída dada por

$$V_o = 100 \times V_i$$

e o objetivo é determinar os valores limites do parâmetro V_i que levam o *AO* à condição de saturação.

Do gráfico da **Fig.6**, a tensão de saturação ali registrada é $V_{o,sat}$ = 13 V. Dessa forma, tem-se que o valor máximo do parâmetro V_i na região linear vale

$$V_{i,máx} = \frac{V_{o,sat}}{100} = \frac{13}{100}$$

$$\boxed{\Rightarrow V_{i,máx} = 0{,}13\ \text{V} = 130\ \text{mV}}$$

Assim a largura da região linear para o *AO* com realimentação negativa vale

$$\boxed{W = 2V_{i,máx} = 2 \times 130\ \text{mV} = 260\ \text{mV}}$$

Comparando-se com o *AO* operando em malha aberta, nota-se portanto que a largura da região linear aumentou 100 vezes, que corresponde ao fator de redução do ganho decorrente da realimentação externa.

A **Fig.9** mostra a característica de transferência para o *AO* com realimentação negativa, ilustrando o alargamento obtido na região linear em comparação à situação que seria obtida para operação em malha aberta.

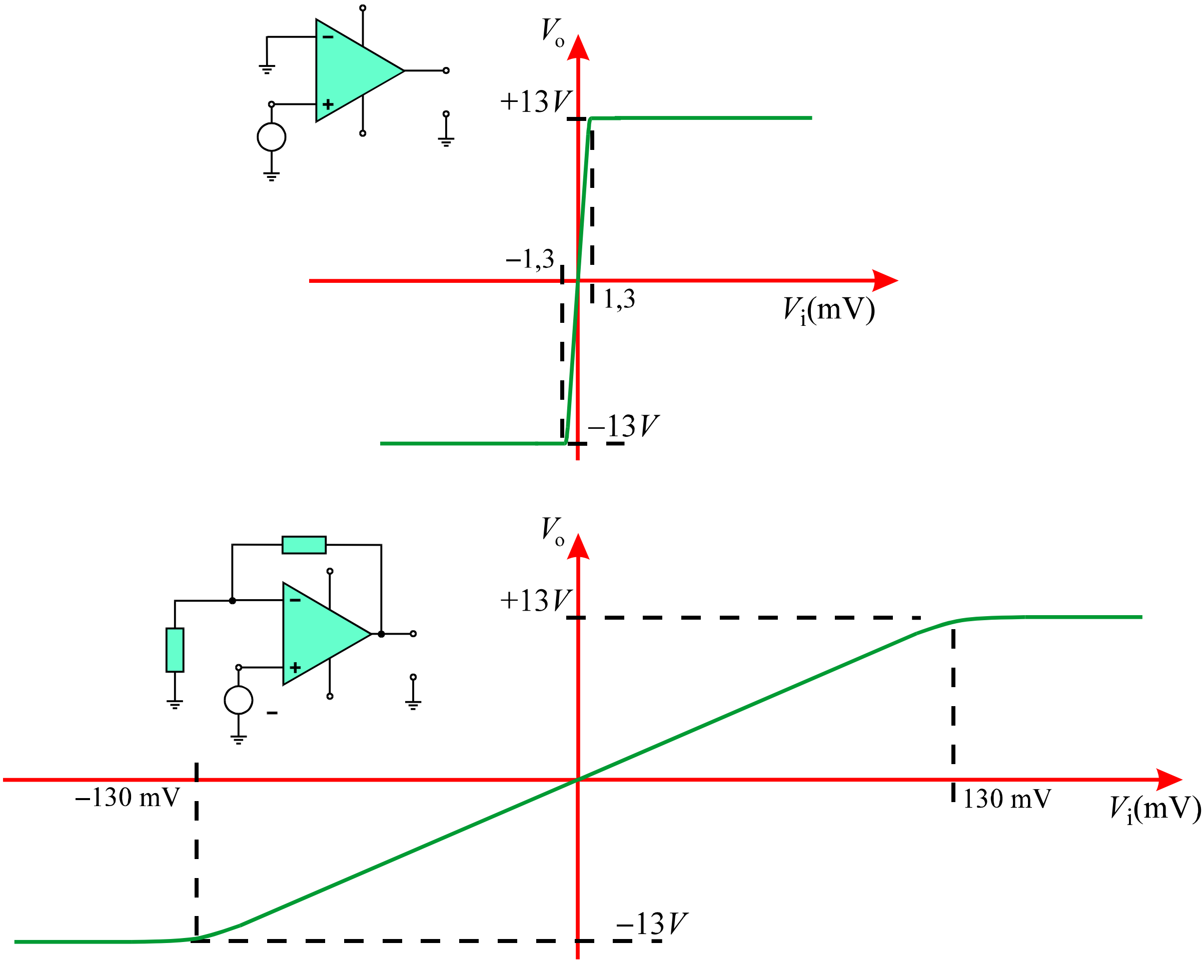


Fig.9 Curvas de transferência do *AO* em malha aberta e com realimentação negativa.

Circuitos que utilizam AOs operando na região linear são denominados de circuitos lineares.

Existem várias aplicações de circuitos lineares que utilizam amplificadores operacionais. Dentre esses circuitos, podem-se destacar aqueles freqüentemente utilizados na área de eletrônica, como por exemplo:

- Amplificador inversor.
- Amplificador não inversor.
- Circuito seguidor de tensão.
- Circuito somador.
- Circuito subtrator.

O funcionamento de cada um desses circuitos é descrito nas próximas seções.

AMPLIFICADOR INVERSOR

O amplificador operacional possui uma entrada de sinal inversora que permite a sua utilização como amplificador de sinal com inversão de fase entre entrada e saída, conforme ilustrado na **Fig.10**.

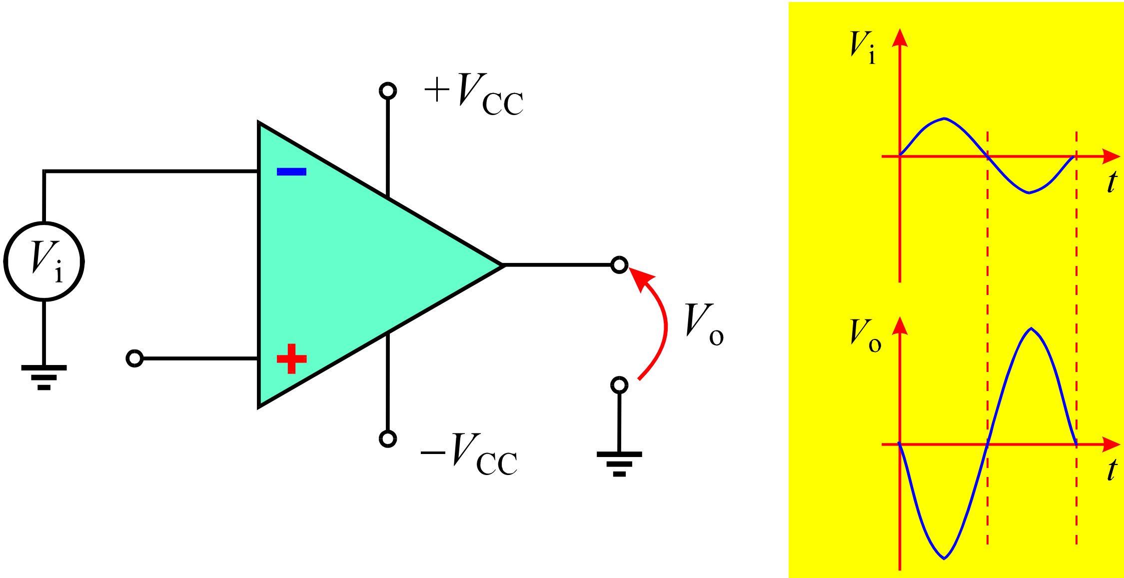


Fig.10 Sinais de entrada e saída em um amplificador inversor.

Como discutido anteriormente, para que o *AO* opere na região linear em uma faixa mais ampla de amplitudes do sinal de entrada, faz-se necessário acrescentar a malha de realimentação negativa ao circuito.

A **Fig.11** mostra a configuração de um amplificador inversor que utiliza um *AO* com realimentação negativa, onde não estão mostrados os outros terminais do componente. Como pode ser aí observado, o terminal não inversor do *AO* está aterrado e os resistores R_1 e R_2 são utilizados na malha de realimentação.

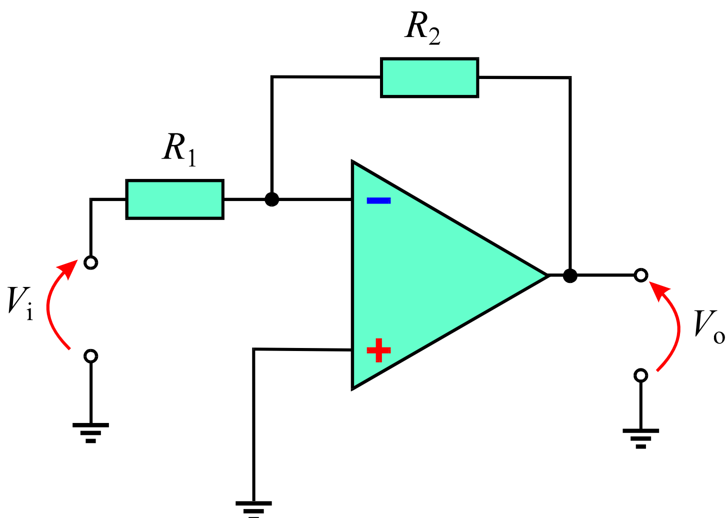


Fig.11 Configuração de um amplificador inversor.

GANHO

O ganho do amplificador inversor, representado pelo parâmetro A_V, depende apenas dos resistores da malha de realimentação. Essa dependência pode ser verificada analisando-se o circuito da **Fig.11**.

Toda análise de circuitos que utilizam *AO*s leva em conta uma propriedade fundamental do dispositivo:

O amplificador operacional exibe uma impedância de entrada extremamente alta, e portanto a corrente injetada em qualquer de seus terminais de entrada é praticamente nula.

Essa observação é extremamente importante e permite, na maioria dos casos, admitir que a impedância de entrada do *AO* seja tomada como infinita, o que equivale a considerar um valor nulo para a corrente injetada em qualquer de seus terminais.

Com essa hipótese, para o circuito mostrado na **Fig.12**, pode-se concluir que os terminais inversor e não inversor são equivalentes, uma vez que não existe fluxo de corrente entre os dois terminais.

A equivalência entre os dois terminais corresponde à igualdade entre os seus potenciais, ou seja, não existe queda de tensão entre os terminais inversor e não inversor. Como o terminal não inversor na **Fig.12** está aterrado, o mesmo deve ocorrer para o terminal inversor e seu potencial é praticamente nulo. Tudo se passa como se o terminal inversor estivesse submetido a um **terra virtual**.

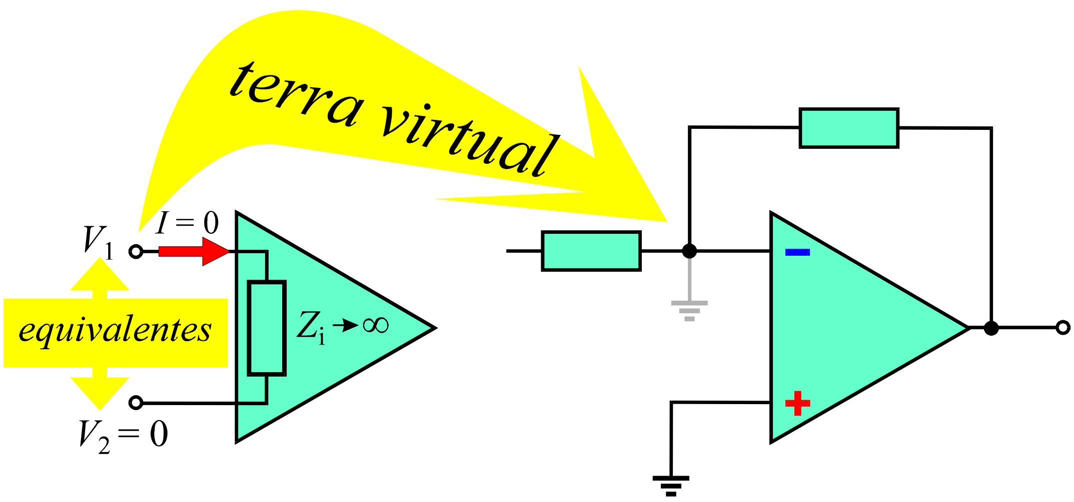


Fig.12 Equivalência entre os terminais de entrada de um amplificador inversor.

Dessa forma, para estabelecer a relação entre entrada e saída do amplificador inversor, basta considerar a porção do circuito mostrada na **Fig.13**, isto é, sem a presença do *AO*. Como pode ser aí observado, a mesma corrente flui nos resistores R_1 e R_2, uma vez que a corrente injetada no terminal inversor é nula.

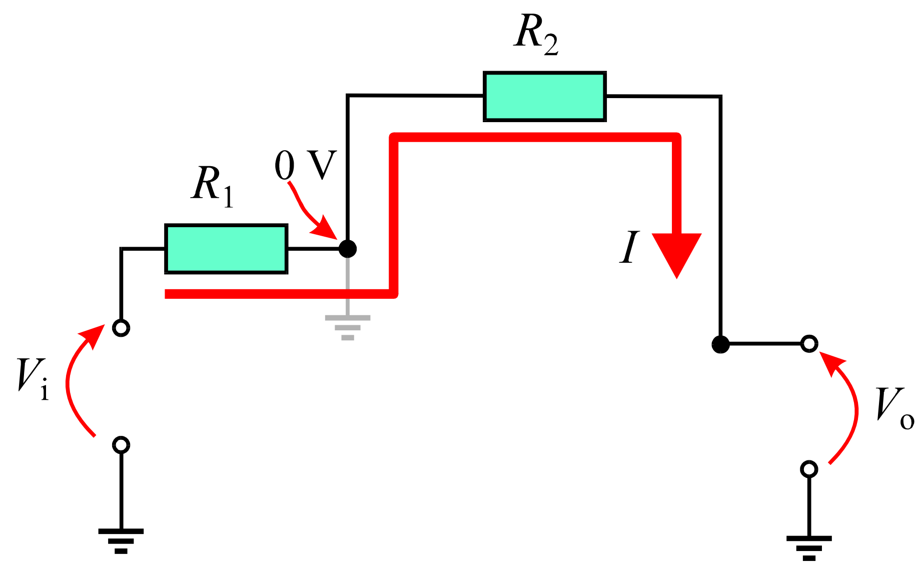


Fig.13 Porção da malha de realimentação do amplificador inversor.

Com o ponto de conexão entre os dois resistores da **Fig.13** estando a um potencial nulo, utilizando-se a lei de Ohm, tem-se que

$$I = \frac{V_i - 0}{R_1} = \frac{0 - V_o}{R_2} \quad \Rightarrow \quad \frac{V_i}{R_1} = -\frac{V_o}{R_2}$$

resultando em

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} V_i \qquad (3)$$

Assim, o ganho do amplificador inversor é negativo, o que indica a inversão de fase, dependendo apenas da razão entre resistências da malha de realimentação e sendo dado por

$$A_V = -\frac{R_2}{R_1} \qquad (4)$$

Exemplo 2: Determinar o ganho do amplificador da **Fig.14**.

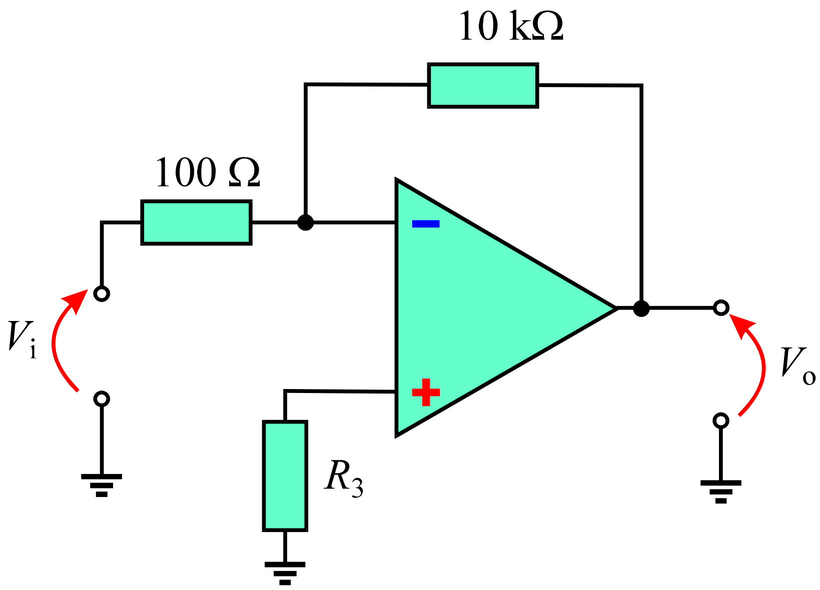


Fig.14 Amplificador inversor para o **Exemplo 2**.

Com R_1 = 100 Ω e R_2 = 10 kΩ, o uso da **Eq.(4)** fornece

$$A_V = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{10.000}{100}$$

$$\boxed{\Rightarrow \quad A_V = -100}$$

IMPEDÂNCIA DE ENTRADA

Admitindo-se que o terminal da entrada inversora é um terra virtual, a impedância de entrada do circuito será o próprio valor de resistência do resistor R_1 da **Fig.11**, ou seja,

$$Z_i = R_1 \tag{5}$$

IMPEDÂNCIA DE SAÍDA

A impedância de saída Z_o do amplificador inversor é sempre muito menor que a impedância de saída do próprio *AO*. Valores típicos de Z_o são geralmente inferiores a 1Ω.

AMPLIFICADOR NÃO INVERSOR

Para a obtenção de um amplificador não inversor utiliza-se a entrada não inversora do *AO*, conforme ilustrado na **Fig.15**, o que resulta em um sinal de saída em fase com o sinal de entrada.

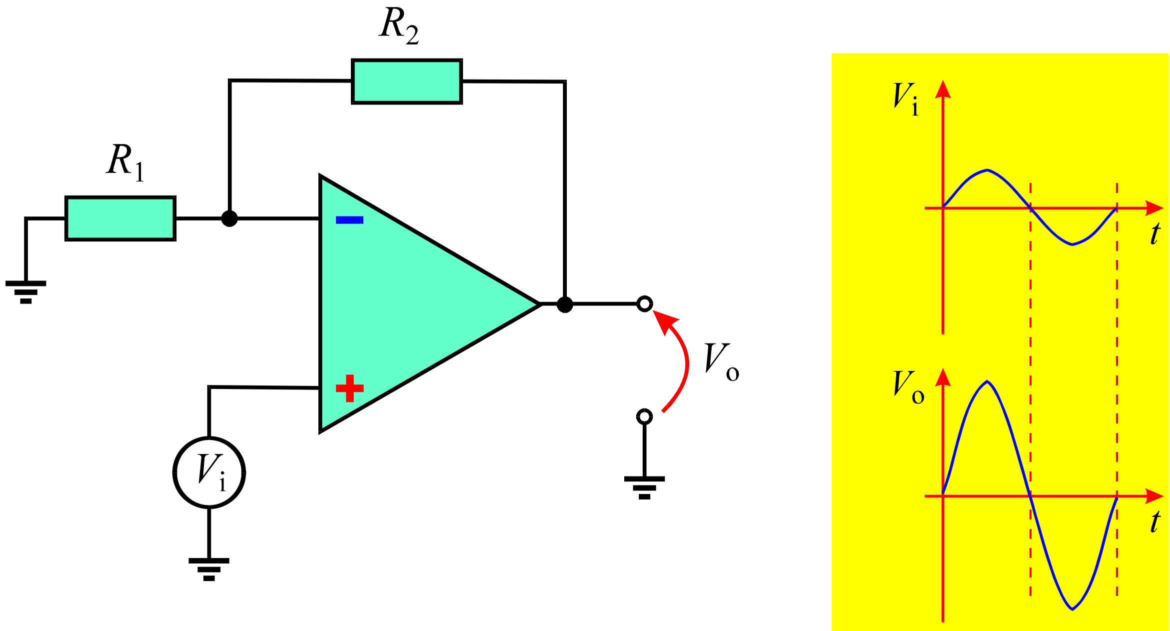


Fig.15 Configuração de um amplificador não inversor.

Conforme discutido anteriormente, a malha de realimentação mostrada na **Fig.15** é utilizada para ampliar a faixa de operação linear do amplificador.

GANHO

O ganho A_V do amplificador não inversor é determinado utilizando-se considerações semelhantes àquelas discutidas na análise do amplificador inversor.

Com base na **Fig.15**, considerando-se como nula a corrente injetada em quaisquer dos terminais de entrada do *AO*, ambos os terminais de entrada podem ser considerados como estando submetidos ao mesmo potencial, ou seja, a tensão sobre o terminal inversor também vale V_i.

Dessa forma, para estabelecer a relação entre entrada e saída do amplificador inversor, basta considerar a porção do circuito mostrada na **Fig.16**, isto é, sem a presença do *AO*. Como pode ser aí observado, o circuito resultante é um divisor de tensão e conseqüentemente, as tensões são relacionadas por

$$\frac{V_o}{R_1 + R_2} = \frac{V_i}{R_1} \quad \Rightarrow \quad V_o = \frac{R_1 + R_2}{R_1} V_i$$

e conseqüentemente,

$$V_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_i \qquad (6)$$

Da **Eq.(6)** obtém-se o ganho do amplificador não inversor

$$A_V = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \qquad (7)$$

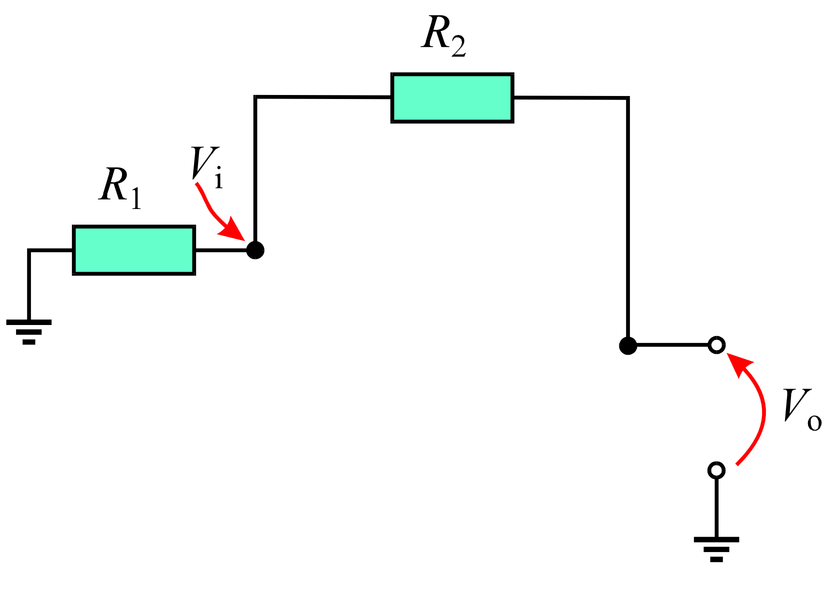


Fig.16 Porção da malha de realimentação do amplificador não inversor.

Dessa forma, o ganho do amplificador não inversor é positivo, indicando que as tensões de entrada e saída permanecem em fase. Em situações em que $R_2 >> R_1$, a **Eq.(7)** pode ser aproximada na forma

$$A_V \approx \frac{R_2}{R_1} \qquad (8)$$

que é semelhante à expressão para o ganho do amplificador inversor, a menos do sinal.

IMPEDÂNCIA DE ENTRADA

No amplificador não inversor o sinal de entrada é aplicado diretamente à entrada não inversora do *AO*. Assim, a impedância de entrada Z_i é a própria impedância de entrada do *AO*.

IMPEDÂNCIA DE SAÍDA

Como no caso do amplificador inversor, a impedância de saída Z_o do amplificador não inversor também é sempre muito menor que a impedância de saída do próprio *AO*. Valores típicos para aquele parâmetro são geralmente inferiores a 1 Ω.

CIRCUITO SEGUIDOR DE TENSÃO

O circuito seguidor de tensão, também conhecido pelo termo inglês *buffer*, utiliza um *AO* com realimentação de tal forma que o ganho de tensão é unitário. Nessas condições, o sinal de saída exibe **mesma amplitude e fase** do sinal de entrada.

O seguidor de tensão é um tipo particular de amplificador não inversor. A **Fig.17** ilustra o diagrama de circuito correspondente.

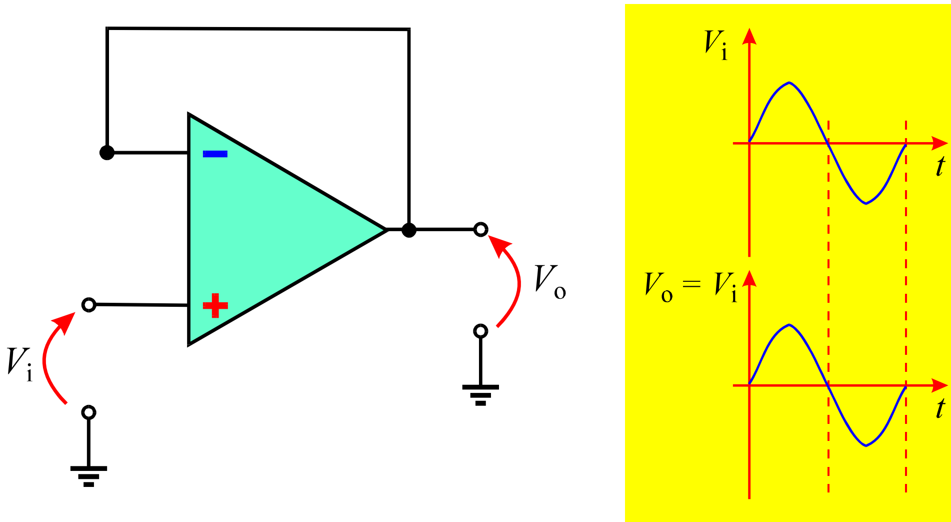


Fig.17 Diagrama de circuito de um seguidor de tensão.

Com base na **Fig.17**, e utilizando a equivalência entre os terminais de entrada do *AO*, conclui-se que

$$V_o = V_i$$

e portanto o seguidor de tensão exibe um ganho $A_V = 1$.

IMPEDÂNCIA

Em termos de impedância o circuito seguidor de tensão comporta-se como um amplificador não inversor tendo como impedância de entrada a própria impedância de entrada do *AO* e uma impedância de saída tipicamente inferior a 1Ω. Essa propriedade do circuito de reproduzir o sinal de entrada em sua saída e transformar impedâncias, permite o seu uso no casamento de impedâncias.

CIRCUITOS ARITMÉTICOS COM *AO*

A combinação de *AO*s e resistores de realimentação permite o desenvolvimento de circuitos capazes de realizar operações aritméticas. Dentre esses destacam-se os circuitos somador e subtrator, discutidos a seguir.

CIRCUITO SOMADOR

O circuito somador fornece na saída uma tensão igual a soma das tensões aplicadas às entradas. A **Fig.18** ilustra a configuração típica de um somador de duas entradas.

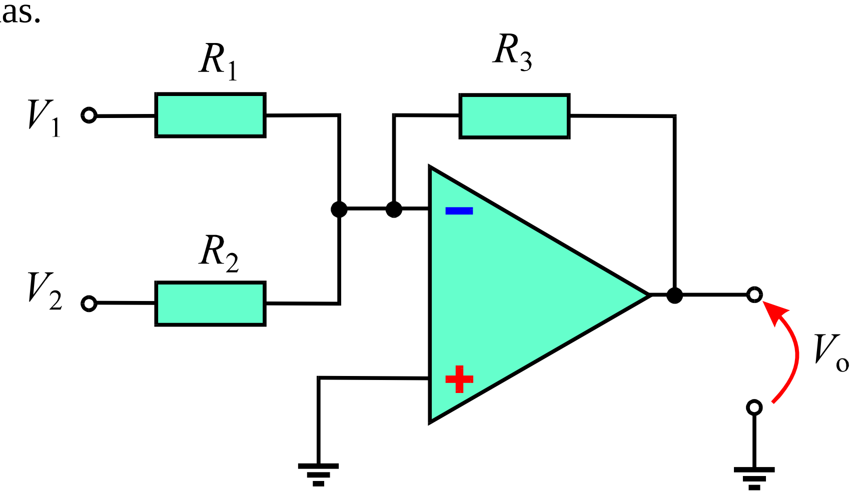


Fig.18 Circuito somador de duas entradas.

Com a corrente injetada na entrada inversora podendo ser considerada nula, as correntes mostradas na **Fig.19** se relacionam por

$$I = I_1 + I_2 \tag{9}$$

Notando que a configuração mostrada na **Fig.19** corresponde àquela de um amplificador inversor, o terminal inversor se reduz a um terra virtual. Portanto, aplicando a lei de Ohm para os três resistores mostrados na **Fig.19**, tem-se que

$$I = \frac{0 - V_o}{R_3} \Rightarrow I = -\frac{V_o}{R_3}$$

$$I_1 = \frac{V_1 - 0}{R_1} \Rightarrow I_1 = \frac{V_1}{R_1}$$

$$I_2 = \frac{V_2 - 0}{R_2} \Rightarrow I_2 = \frac{V_2}{R_2}$$

Inserindo essas últimas relações na **Eq.(9)**, resulta em

$$-\frac{V_o}{R_3} = \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} \Rightarrow \frac{V_o}{R_3} = -\left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2}\right)$$

ou equivalentemente,

$$V_o = -\left(\frac{R_3}{R_1}V_1 + \frac{R_3}{R_2}V_2\right) \tag{10}$$

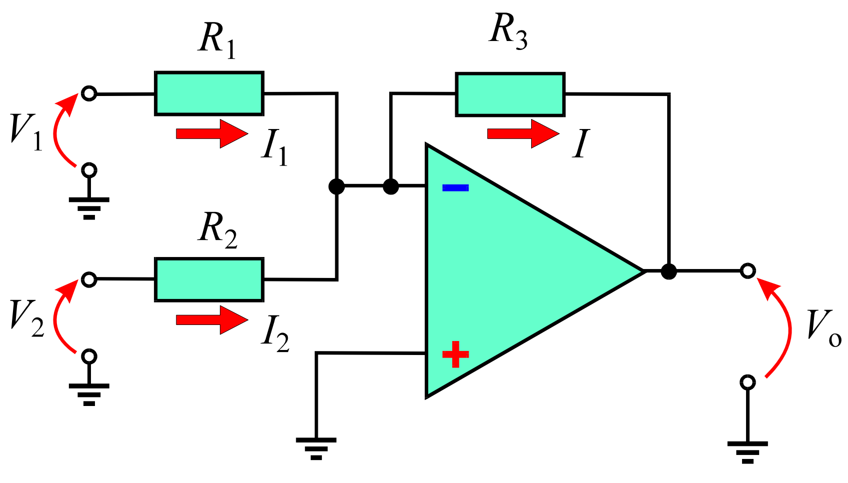


Fig.19 Circuito somador de duas entradas e parâmetros elétricos correspondentes.

Escolhendo-se os resistores com valores de resistência idênticos, a **Eq.(10)** pode ser simplificada na forma

$$V_o = -(V_1 + V_2) \tag{11}$$

A **Eq.(11)** mostra que, a menos do sinal, a tensão de saída é numericamente igual à soma das tensões de entrada V_1 e V_2.

Se for necessário obter a soma não invertida das tensões V_1 e V_2 pode-se usar um amplificador inversor com ganho unitário após o somador, conforme ilustrado na **Fig.20**.

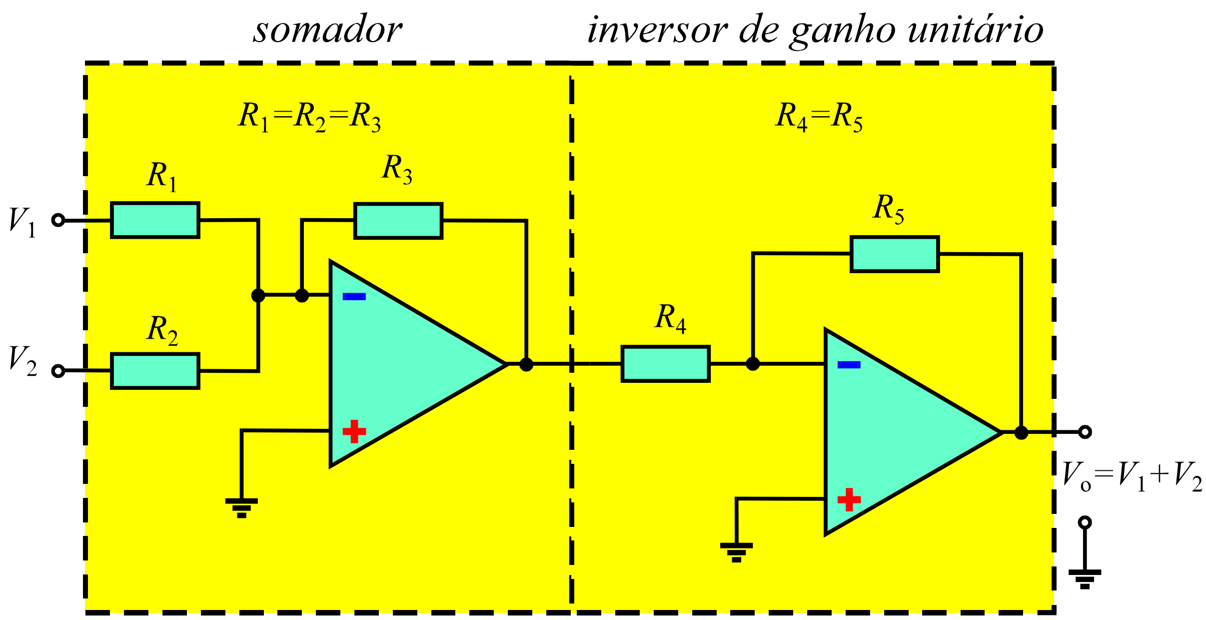


Fig.20 Circuito somador seguido de inversor de ganho unitário para correção do sinal da tensão de saída.

O circuito somador de mais de duas entradas, ilustrado na **Fig.21** é uma extensão natural daquele de duas entradas. Escolhendo todos os resistores com mesma resistência, obtém-se uma tensão de saída

$$V_o = -(V_1 + V_2 + V_3 + \ldots + V_n) \tag{12}$$

Se os resistores da **Fig.21** exibem resistências distintas, a tensão de saída pode ser obtida a partir da generalização da **Eq.(10)**, resultando na expressão

$$V_o = -\left(\frac{R_o}{R_1}V_1 + \frac{R_o}{R_2}V_2 + \frac{R_o}{R_3}V_2 + \ldots + \frac{R_o}{R_n}V_2\right) \tag{13}$$

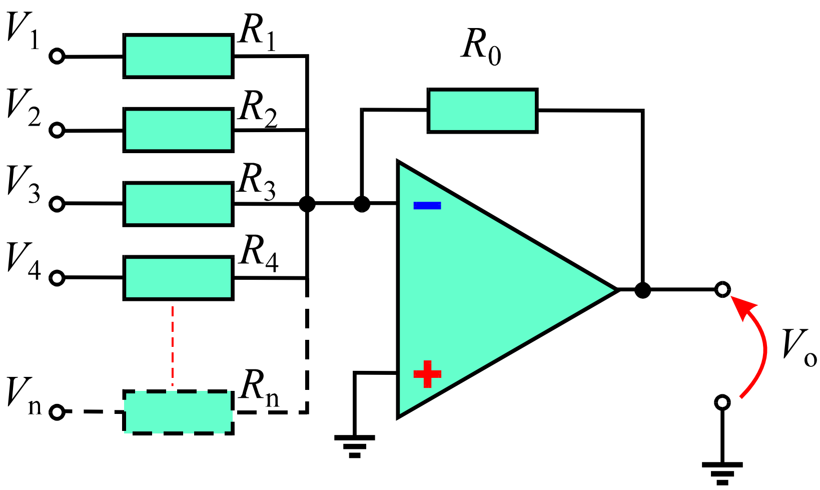


Fig.21 Circuito somador de *n* entradas.

CIRCUITO SUBTRATOR

O *AO* pode ser utilizado para obtenção de um circuito que realiza a subtração entre tensões. O efeito de subtração é obtido aplicando uma tensão na entrada inversora e outra na não inversora. A **Fig.22** mostra a configuração de um circuito subtrator.

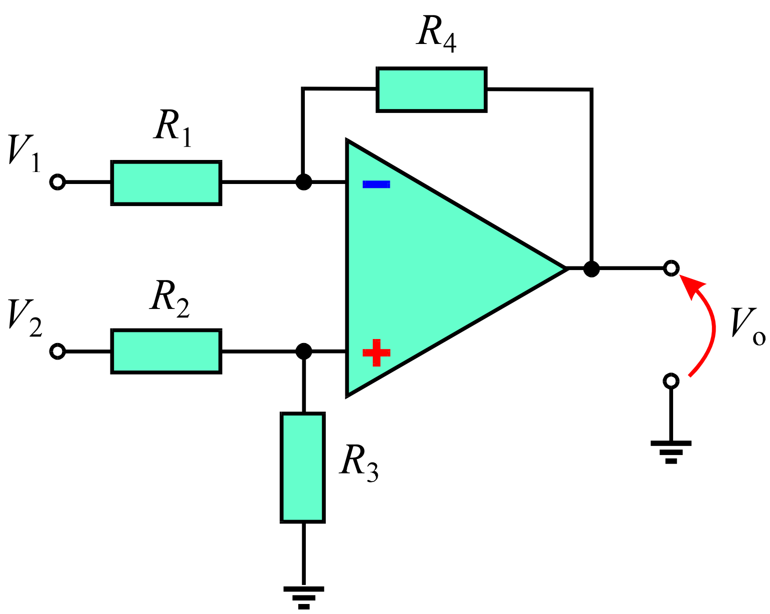


Fig.22 Configuração de um circuito subtrator.

Para estabelecer a relação entre tensões no circuito, considera-se que os terminais inversor e não inversor estejam a um mesmo potencial e que a corrente injetada em cada entrada do *AO* seja nula. Essa hipótese permite separar as malhas do circuito em dois divisores de tensão independentes, com o nó central de cada divisor submetido à mesma tensão V_i, conforme ilustrado na **Fig.23**.

As equações dos divisores de tensão irão envolver o parâmetro V_i. Para estabelecer a relação entre os parâmetros V_o, V_1 e V_2, é necessário que o termo V_i seja eliminado das equações. Da hipótese de corrente nula injetada em cada terminal de entrada do *AO*, tem-se que

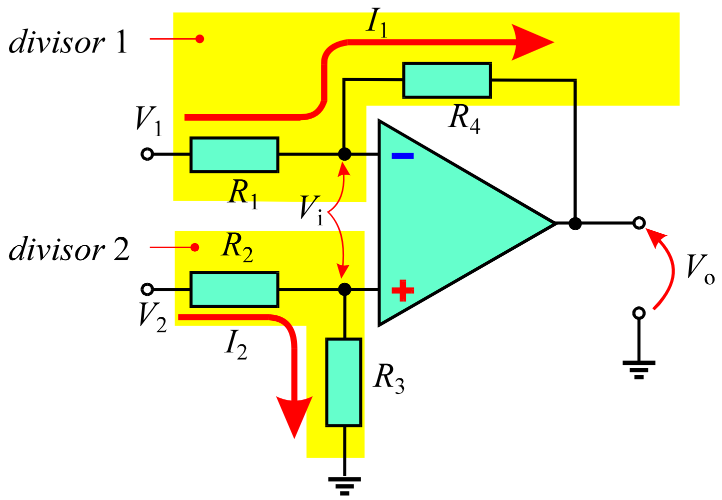


Fig.23 Circuito subtrator e parâmetros elétricos correspondentes.

Divisor de tensão 1:

$$\frac{V_1 - V_i}{R_1} = \frac{V_i - V_o}{R_4} \Rightarrow V_o = \left(1 + \frac{R_4}{R_1}\right)V_i - \frac{R_4}{R_1}V_1$$

que fornece

$$V_o = \left(\frac{R_1 + R_4}{R_1}\right)V_i - \frac{R_4}{R_1}V_1 \qquad (14)$$

Divisor de tensão 2:

$$\frac{V_i}{R_3} = \frac{V_2}{R_2 + R_3}$$

que fornece

$$V_i = \frac{R_3}{R_2 + R_3}V_2 \qquad (15)$$

Inserindo a **Eq.(15)** na **Eq.(14)**, obtém-se

$$V_o = \left(\frac{R_1 + R_4}{R_1}\right)\left(\frac{R_3}{R_2 + R_3}\right)V_2 - \frac{R_4}{R_1}V_1$$

ou equivalentemente,

$$V_o = \frac{R_3}{R_1}\left(\frac{R_1 + R_4}{R_2 + R_3}\right)V_2 - \frac{R_4}{R_1}V_1 \qquad (16)$$

A **Eq.(16)** é a expressão geral relacionando a tensão de saída V_o às tensões de entrada V_1 e V_2. Os valores de resistência podem ser escolhidos de forma que o circuito opere de acordo com as seguintes condições:

Circuito subtrator

Escolhendo-se valores iguais para as resistências do circuito, ou seja,

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4$$

a **Eq.(16)** fornece

$$V_o = V_2 - V_1 \qquad (17)$$

que corresponde a uma tensão de saída igual à diferença entre as tensões de entrada.

Amplificador diferencial

Se os valores de resistência no circuito obedecem às relações

$$R_2 = R_1 \,,\, R_3 = R_4$$

a **Eq.(16)** fornece

$$V_o = \frac{R_3}{R_1}\left(\frac{R_1 + R_4}{R_2 + R_3}\right)V_2 - \frac{R_4}{R_1}V_1 = \frac{R_4}{R_1}\left(\frac{R_1 + R_4}{R_1 + R_4}\right)V_2 - \frac{R_4}{R_1}V_1 = \frac{R_4}{R_1}V_2 - \frac{R_4}{R_1}V_1$$

ou equivalentemente,

$$V_o = \frac{R_4}{R_1}(V_2 - V_1) \qquad (18)$$

A **Eq.(18)** mostra que a tensão de saída corresponde à diferença entre tensões de entrada, com um fator de escala igual à razão entre as resistências R_4 e R_1.

Se $R_4 > R_1$, a tensão de saída é uma versão amplificada da diferença entre tensões, e nessas condições o circuito é denominado de **amplificador diferencial.**

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Em geral, de que forma depende a tensão de saída com respeito à tensão diferencial aplicada à entrada de um *AO*? Como se denomina a curva representativa dessa dependência?

2. Qual a técnica comumente empregada para alargar a região linear de um *AO*?

3. Qual a relação entre ganho e largura da região linear de um *AO*?

4. O que se pode dizer a respeito da impedância de entrada, corrente injetada nos terminais de entrada, e diferença de potencial entre aqueles terminais para um *AO* ideal?

5. Qual o ganho de um amplificador não inversor com a realimentação feita com resistores tais que $R_1 = R_2$?

6. Qual o ganho de um seguidor de tensão e qual o valor correspondente em dB?

7. Para o circuito da **Fig.18**, admitindo $R_1 = 100\ \Omega$, $R_2 = 150\ \Omega$, $R_3 = 300\ \Omega$, $V_1 = 10$ V e $V_2 = 5$ V, determine a tensão de saída.

8. Para o circuito subtrator da **Fig.22**, admitindo $R_1 = 100\ \Omega$, $R_2 = 150\ \Omega$, $R_3 = 50\ \Omega$, $R_4 = 300\ \Omega$, $V_1 = 5$ V, $V_2 = 5$ V, determine a tensão de saída.

BIBLIOGRAFIA

LANDO, Roberto Antônio & ALVES, Sérgio Rios, Amplificador operacional, São Paulo, Érica, 1983.

MALVINO, Albert Paul, Eletrônica, São Paulo, Mc Graw Hill do Brasil, 1986.

MILLMAN, Jacob & HALKIAS, Christos C. Eletrônica: dispositivos e circuitos, Vol.2, Mc Graw- Hill do Brasil, São Paulo, 1981.

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Introdução

Capacitores podem ser utilizados em circuitos de corrente alternada, por exemplo, para a obtenção de defasagem entre sinais ou mesmo na filtragem ou sintonização de freqüências. Os capacitores podem também ser utilizados em circuitos de corrente contínua, principalmente em aplicações que envolvam o chaveamento de sinais.

Este fascículo é dirigido a um estudo mais detalhado da dinâmica envolvida nos processos de carga e descarga de um capacitor em circuitos de corrente contínua, de forma a permitir que o leitor adquira o embasamento necessário à compreensão do princípio de funcionamento dos circuitos de temporização que serão estudados em fascículos posteriores.

Para a boa compreensão do conteúdo e desenvolvimento das atividades contidas neste fascículo, o leitor deverá estar familiarizado com os conceitos relativos a:

- Resistência elétrica.
- Fontes *cc*.
- Capacitores.

Dinâmica de carga e descarga em capacitores

O PROCESSO DE CARGA DE UM CAPACITOR

O material que constitui as armaduras de um capacitor é eletricamente neutro no seu estado natural. Isso significa que no estado natural não existe diferença de potencial entre as armaduras de um capacitor. Sob essas condições o **capacitor está descarregado**.

Entretanto, se um capacitor for conectado a uma fonte *cc*, após ter decorrido algum tempo, irá se estabelecer entre as suas armaduras a mesma diferença de potencial existente entre os pólos da fonte, conforme ilustrado na **Fig.1**

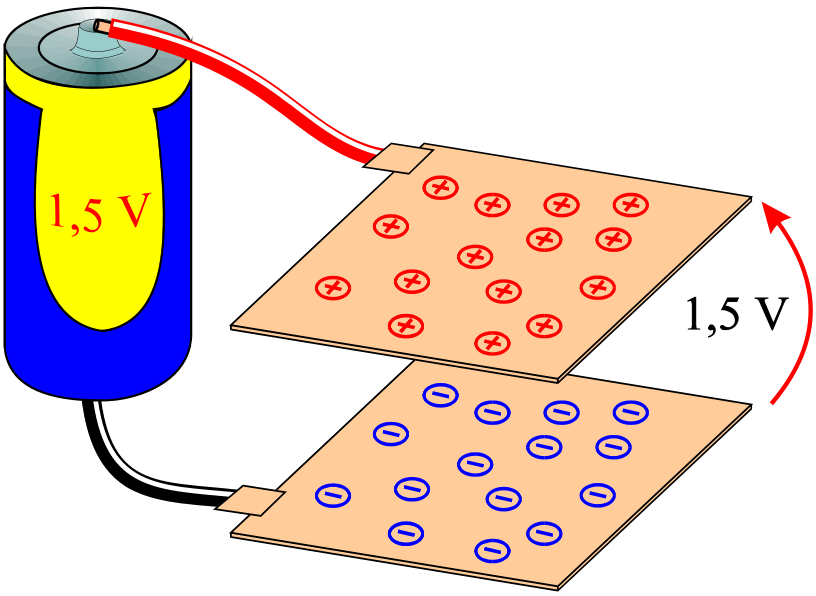


Fig.1 Capacitor conectado em paralelo a uma bateria.

Quando a diferença de potencial entre armaduras atinge um valor final de equilíbrio, o capacitor está **carregado**. O processo pelo qual o capacitor se carrega, assumindo uma diferença de potencial entre as armaduras, é denominado de **processo de carga do capacitor**.

No processo de carga do capacitor, a tensão entre armaduras varia com o tempo de forma não-linear. Para entender a existência dessa não-linearidade é preciso conhecer algumas propriedades elétricas do capacitor.

RELAÇÃO ENTRE TENSÃO E CARGA ARMAZENADA

Durante qualquer estágio do processo de carga do capacitor, a quantidade de carga removida de uma das armaduras é transferida para a outra armadura. Por isso ambas as armaduras armazenam cargas iguais e de sinais opostos em qualquer instante de tempo.

A diferença de potencial entre as armaduras de um capacitor é proporcional à quantidade de carga armazenada na armadura positivamente carregada. Se V é a diferença de potencial entre as armaduras positiva e negativa, e Q é a quantidade de carga armazenada na armadura positiva, tem-se que

$$V = \frac{Q}{C} \qquad (1)$$

onde C é a capacitância.

Considerando a carga Q expressa em *coulombs* e a capacitância C expressa em *faradas*, a **Eq.(1)** fornece o valor correspondente em *volts* para a diferença de potencial entre as armaduras do capacitor.

A capacitância é um parâmetro independente da quantidade de carga armazenada em cada armadura e portanto a **Eq.(1)** pode ser representada graficamente conforme ilustrado no gráfico da **Fig.2**.

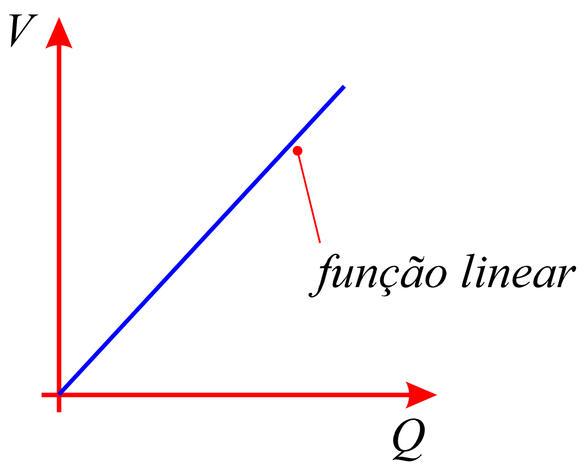


Fig.2 Representação gráfica da **Eq.(1)**.

RELAÇÃO ENTRE TENSÃO E CORRENTE

A quantidade de carga adicionada à armadura positiva do capacitor em um determinado intervalo de tempo depende da corrente de carga. Dessa forma, um alto valor de corrente implica um rápido aumento da quantidade de carga armazenada na armadura positiva e vice-versa. Da relação linear entre tensão e carga armazenada, expressa pela **Eq.(1)**, pode-se concluir que:

Baixa corrente de carga	$\Rightarrow$	Carga armazenada aumenta lentamente	$\Rightarrow$	Diferença de potencial aumenta lentamente
Alta corrente de carga	$\Rightarrow$	Carga armazenada aumenta rapidamente	$\Rightarrow$	Diferença de potencial aumenta rapidamente

A **Fig.3** ilustra a dependência com o tempo da tensão no capacitor como função da corrente que flui entre seus terminais.

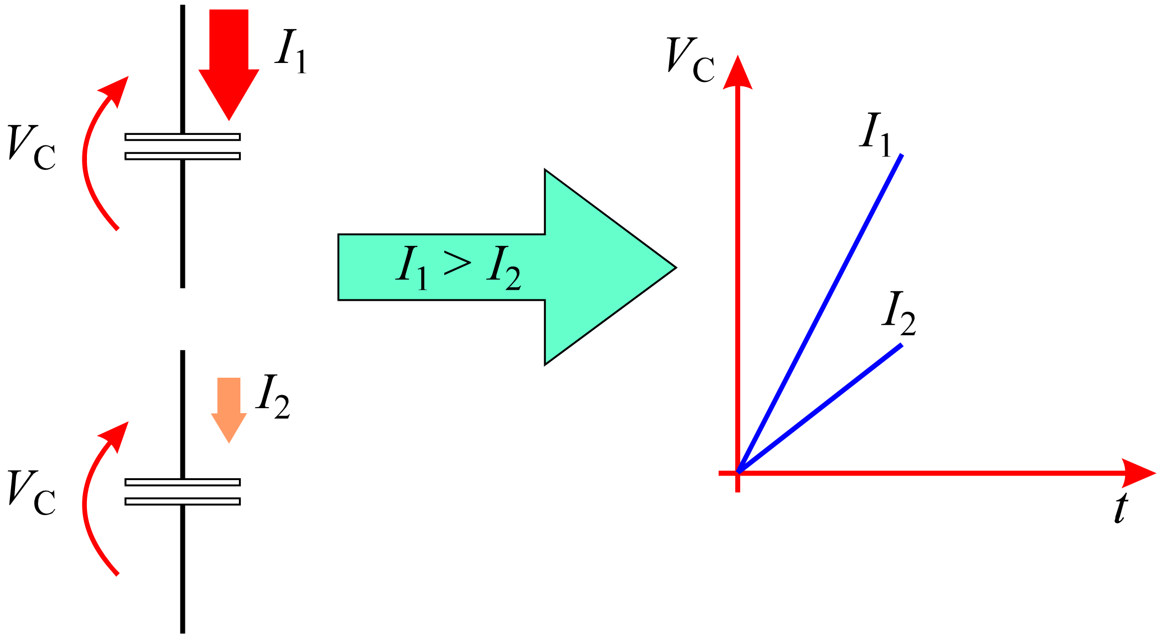


Fig.3 Variação da tensão como função do tempo para níveis distintos da corrente no capacitor.

Pelo que foi exposto anteriormente, conclui-se que a rapidez com que o capacitor se carrega depende fundamentalmente da corrente de carga, sendo este o princípio que estabelece a não-linearidade da dependência temporal da tensão ou da carga armazenada durante o processo de carga do capacitor.

O circuito mostrado na **Fig.4** facilita a análise da dinâmica de carga do capacitor, ou seja, o processo de variação da carga armazenada ou da tensão no capacitor como função do tempo.

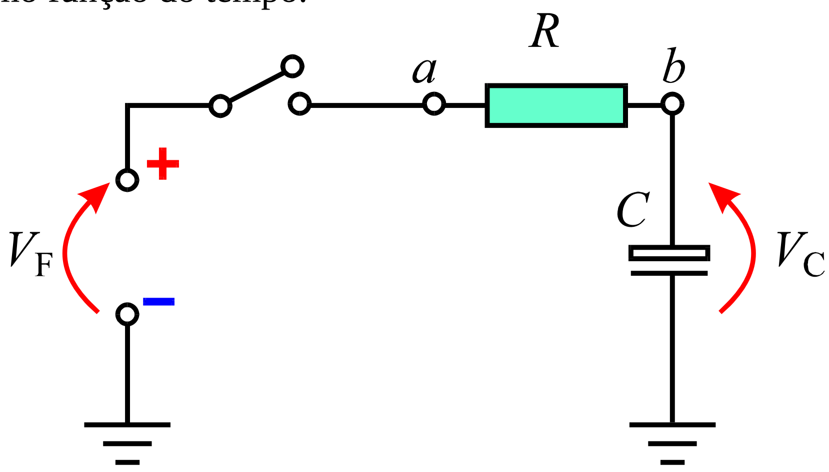


Fig.4 Circuito utilizado para a análise da dinâmica de carga de um capacitor.

Admitindo-se que o capacitor na **Fig.4** esteja inicialmente descarregado, a condição inicial para os parâmetros elétricos do circuito pode ser posta na forma

tensão da fonte	$\Rightarrow$	V_F
tensão no capacitor	$\Rightarrow$	V_{C0}
corrente de carga	$\Rightarrow$	I_0

Quando a chave é ligada no instante de tempo $t = 0$, por estar descarregado, o capacitor comporta-se efetivamente como um curto-circuito. Sob essas condições, a queda de tensão no capacitor sem mantém no valor $V_{C0} = 0$. Dessa forma a tensão V_F da fonte é aplicada diretamente aos terminais do resistor, ou seja, o terminal *b* do resistor fica submetido efetivamente a um potencial de 0 V, e a corrente inicial do circuito é simplesmente

$$I_0 = \frac{V_F}{R}$$

onde *R* é a resistência do resistor.

A medida que o tempo passa, o capacitor começa a se carregar e a queda de tensão entre seus terminais começa a aumentar. Como resultado, o potencial do terminal *b* do resistor aumenta. Representando a tensão no capacitor no tempo *t* por $V_C(t)$, conforme mostrado na **Fig.5**, a tensão sobre o resistor no tempo *t* é dada por

$$V_R(t) = V_F - V_C(t)$$

e a corrente do circuito no tempo *t* pode ser obtida da relação

$$I(t) = \frac{V_F - V_C(t)}{R} \qquad (2)$$

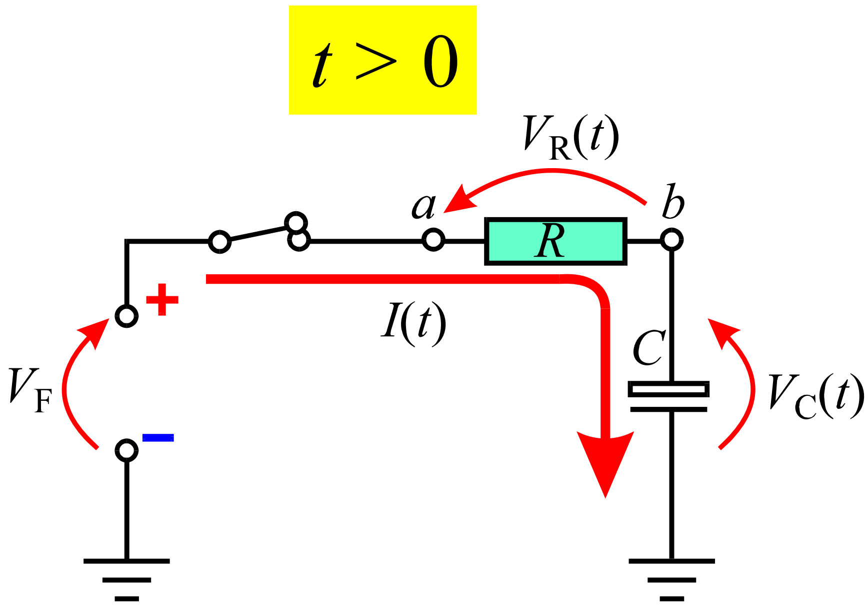


Fig.5 Circuito da **Fig.4** após ligação da chave.

A **Fig.6** ilustra qualitativamente a dependência da corrente de carga e da tensão no capacitor como função do tempo. Esses parâmetros elétricos estão aí representados por valores percentuais.

Como se pode observar no gráfico da **Fig.6**, imediatamente após o fechamento da chave, a corrente no circuito é máxima, visto que a queda de tensão no capacitor é nula em t = 0. Esse alto valor de corrente faz que o capacitor comece a se carregar rapidamente, e como previsto pela **Eq.(1)**, isso provoca um rápido aumento da queda de tensão no capacitor.

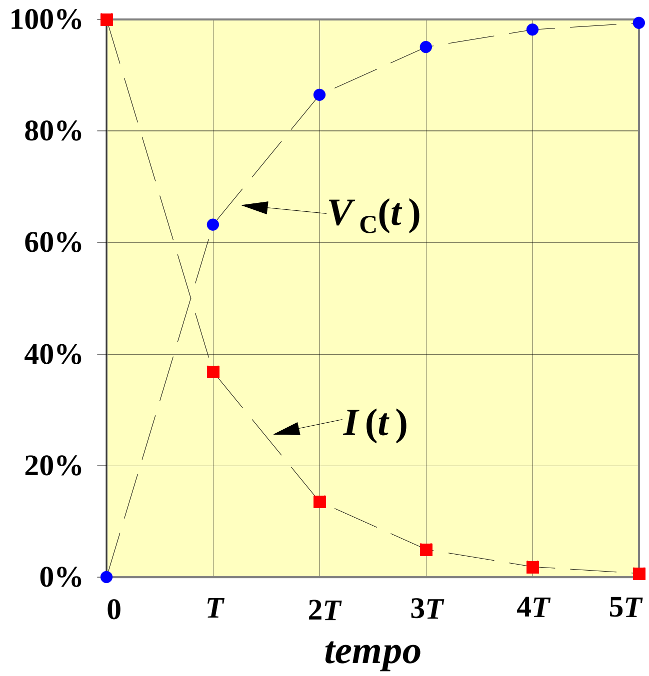


Fig.6 Valores percentuais da corrente e da tensão no capacitor da **Fig.5** em diferentes instantes de tempo.

No gráfico da **Fig.6**, a queda de tensão atinge pouco mais de 60% de seu valor máximo no instante de tempo $t = T$. Esse aumento na queda de tensão reduz o numerador da **Eq.(2)**, o que provoca uma redução na corrente para menos de 40% de seu valor máximo no instante de tempo $t = T$. Com essa redução de corrente, a partir de $t = T$ o capacitor se carrega um pouco mais lentamente e pela **Eq.(1)** a queda de tensão também deve aumentar de forma mais lenta. No instante de tempo $t = 2T$ a queda de tensão no capacitor atinge um pouco mais de 80% de seu valor máximo e a corrente do circuito fica reduzida a pouco menos de 20% de seu valor inicial.

O processo descrito anteriormente continua até que, após decorrido certo tempo, o capacitor esteja totalmente carregado. Nessas condições a queda de tensão no capacitor atinge um valor que não mais varia no tempo, e a corrente no circuito se reduz a um valor nulo.

Pela **Eq.(2)**, o valor final a tensão V_{Cf} no capacitor, necessária para produzir uma corrente nula no circuito, pode ser obtida da condição

$$\frac{V_{\text{F}} - V_{\text{Cf}}}{R} = 0 \Rightarrow V_{\text{F}} - V_{\text{Cf}} = 0$$

$$\boxed{\Rightarrow \quad V_{\text{Cf}} = V_{\text{F}}}$$

ou seja, o valor final da queda de tensão no capacitor é igual à tensão da fonte.

Diminuindo os intervalos de tempo entre medições dos valores de tensão no capacitor e de corrente no circuito, resultaria em variações mais graduais daqueles parâmetros, conforme ilustrado no gráfico da **Fig.7**.

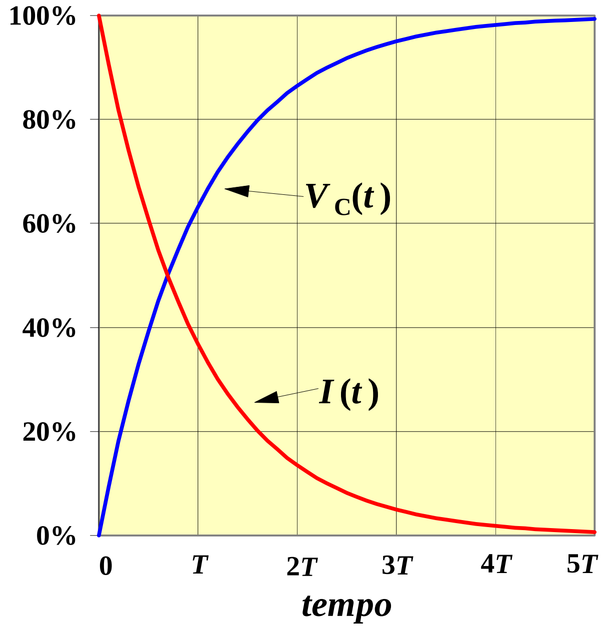


Fig.7 Dependência temporal da corrente e tensão no capacitor da **Fig.5**.

Exemplo 1: Para o circuito mostrado na **Fig.8**, determine:

a) A corrente inicial do circuito, imediatamente após o fechamento da chave.
b) A carga armazenada na armadura positiva do capacitor no equilíbrio.

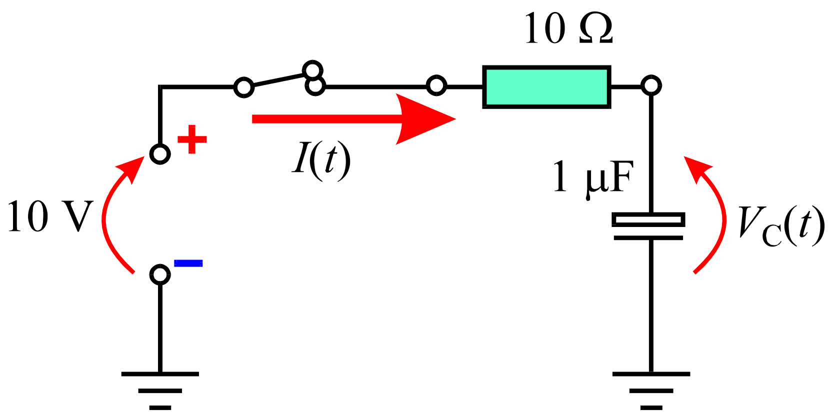


Fig.8 Circuito *RC* para o **Exemplo 1**.

De acordo com a **Fig.8**, tem-se que:

C = 1 μF=10^{-6} F
R=10 Ω
V_F=10 V

a) No tempo t = 0, após o fechamento da chave, a queda de tensão no capacitor é nula e a **Eq.(2)** fornece

$$I(t=0) = I_0 = \frac{V_F - V_C(0)}{R} = \frac{10\text{V} - 0\text{V}}{10\Omega}$$

$$\boxed{\Rightarrow I_0 = 1\text{ A}}$$

b) No equilíbrio a corrente no circuito é nula e a queda de tensão no capacitor assume o valor final

$$V_{Cf} = V_F = 10\text{V}$$

A relação entre os valores de equilíbrio da carga armazenada Q_f e a queda de tensão no capacitor V_{Cf} é dada pela **Eq.(1)**,

$$V_{Cf} = \frac{Q_f}{C} \quad \Rightarrow \quad Q_f = CV_{Cf}$$

e utilizando o valor de C fornecido anteriormente resulta

$$Q_f = 10^{-6}\,\mathrm{F} \times 10\,\mathrm{V} = 10^{-5}\,\mathrm{C}$$

ou alternativamente,

$$\boxed{\Rightarrow\; Q_f = 10\,\mu\mathrm{C}}$$

Vale salientar que a forma geral de cada curva mostrada na **Fig.7** é independente do valor de tensão imposto pela fonte. No entanto, dependendo dos valores dos parâmetros R e C no circuito da **Fig.5**, as curvas da **Fig.7** podem se estender ou contrair horizontalmente, conforme discutido na seção seguinte.

CONSTANTE DE TEMPO

O tempo de ocorrência do processo de carga de um capacitor depende basicamente de dois parâmetros:

- Capacitância do capacitor.
- Resistência elétrica do circuito.

Os exemplos a seguir mostram de que forma se manifesta essa dependência.

Exemplo 2: Determinar qual dos circuitos mostrados na **Fig.9** irá produzir um carregamento mais rápido do capacitor.

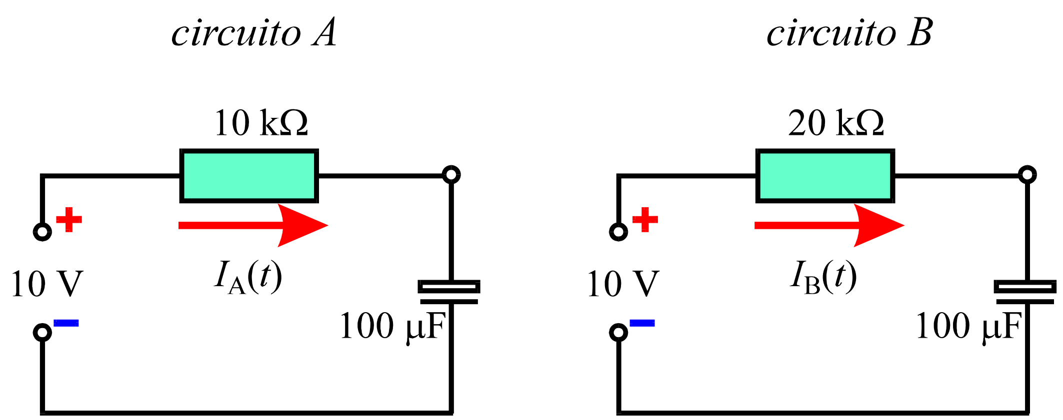


Fig.9 Circuitos *RC* para o **Exemplo 2**.

Para o circuito A da **Fig.9** a corrente inicial I_A é obtida da **Eq.(2)** com $V_C(t=0)=0$, resultando em

$$I_A(t=0) = I_{A0} = \frac{10-0}{10.000} = 0{,}001\ \text{A}$$

$$\boxed{\Rightarrow I_{A0} = 1\,\text{mA}}$$

Para o circuito *B* o mesmo procedimento fornece

$$I_B(t=0) = I_{B0} = \frac{10-0}{20.000} = 0{,}0005\ \text{A}$$

$$\boxed{\Rightarrow I_{B0} = 0{,}5\ \text{mA}}$$

Conclui-se portanto que a corrente inical no circuito *A* é duas vezes maior que aquela do circuito *B* da **Fig.9**. Conforme já discutido anteriormente, em um determinado instante de tempo, a rapidez com que a tensão e a carga armazenada no capacitor aumentam, é proporcional à corrente no circuito nesse instante de tempo. Da relação obtida entre correntes iniciais, pode-se afirmar que o capacitor do circuito *A* começa a se carregar duas vezes mais rapidamente do que o capacitor do circuito *B* da **Fig.9**.

As **Fig.10** e **11** mostram a dependência com o tempo da corrente e tensão no capacitor em cada configuração de circuito.

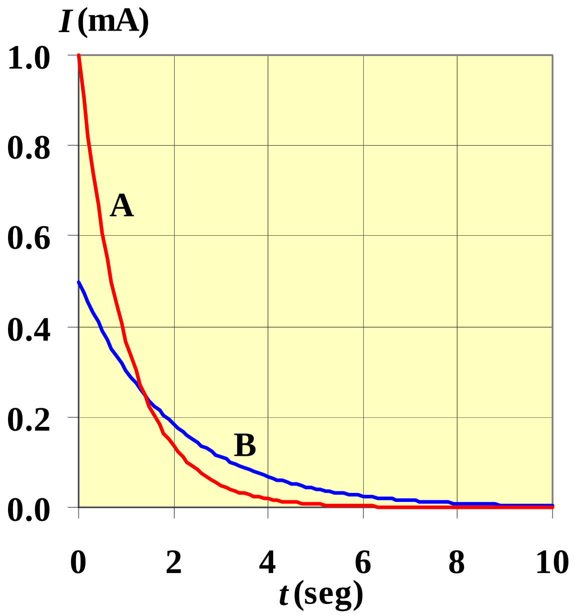


Fig.10 Dependência temporal da corrente nos circuitos da **Fig.9**.

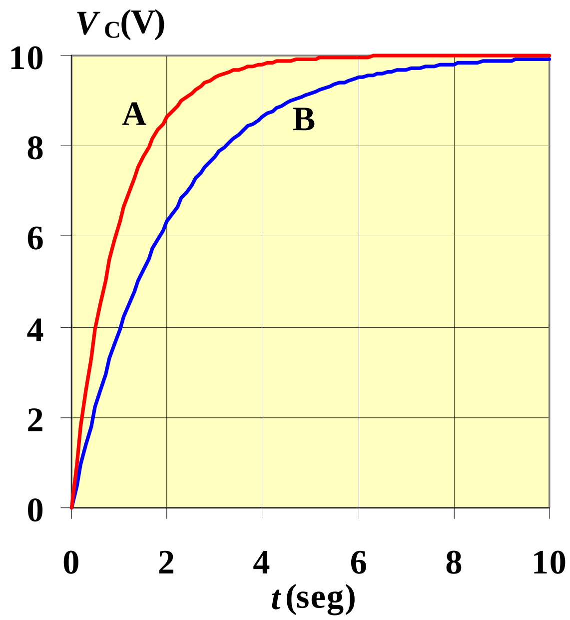


Fig.11 Dependência temporal da tensão nos circuitos da **Fig.9**.

Note-se que a corrente final tende a um valor nulo e a tensão final tende ao valor de 10 V, em ambos os casos. No entanto, os tempos de ocorrência desses eventos são distintos. Mais precisamente, o processo referente ao circuito *A* ocorre mais rapidamente que aquele relacionado ao circuito *B* da **Fig.9**.

Representando o tempo de carga do capacitor pelo parâmetro T_{carga}, o resultado do **Exemplo 2** sugere a seguinte dependência entre os parâmetros T_{carga} e R:

$R \uparrow \Rightarrow T_{carga} \uparrow$

$R \downarrow \Rightarrow T_{carga} \downarrow$

ou equivalentemente:

O tempo de carga do capacitor em um circuito RC é diretamente proporcional à resistência elétrica do circuito.

Exemplo 3: Determinar qual dos circuitos mostrados na **Fig.12** irá produzir um carregamento mais rápido do capacitor.

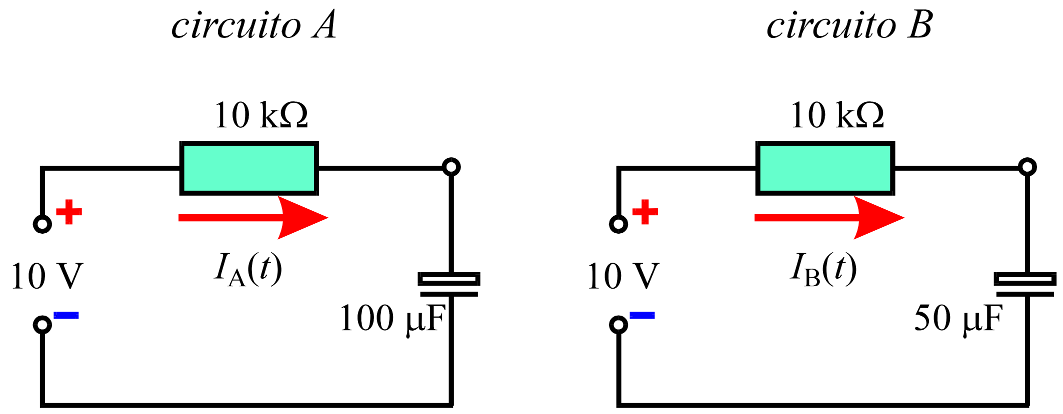


Fig.12 Circuitos *RC* para o **Exemplo 3**.

Ambos os circuitos da **Fig.12** exibem a mesma corrente inicial e a mesma tensão final no capacitor, ou seja,

$$\boxed{I_{A0} = I_{B0} = 1\ \text{mA}}$$

$$\boxed{V_{Cf} = 10\ \text{V}}$$

Pela **Eq.(1)** o capacitor do circuito *A* armazenará uma carga final

$$Q_{Af} = C_A V_{Cf} = 100 \times 10^{-6} \times 10 = 0{,}001\ \text{C} = 1\ \text{mC}$$

e o capacitor do circuito *B*, uma carga final

$$Q_{Bf} = C_B V_{Cf} = 50 \times 10^{-6} \times 10 = 0{,}0005\ \text{C} = 0{,}5\ \text{mC}$$

o que permite obter

$$\boxed{\Rightarrow \quad Q_{Af} = 2Q_{Bf}}$$

Conclui-se portanto que a carga final armazenada no capacitor do circuito *A* é duas vezes maior que aquela correspondente ao capacitor do circuito *B* da **Fig.12**. Como ambos os circuitos exibem o mesmo valor inicial de corrente, conclui-se que o capacitor do circuito *A* necessita um tempo duas vezes maior para se carregar do que o capacitor do circuito *B* da **Fig.12**.

A **Fig.13** mostra as dependências temporais da corrente, tensão e carga armazenada no capacitor em cada configuração de circuito.

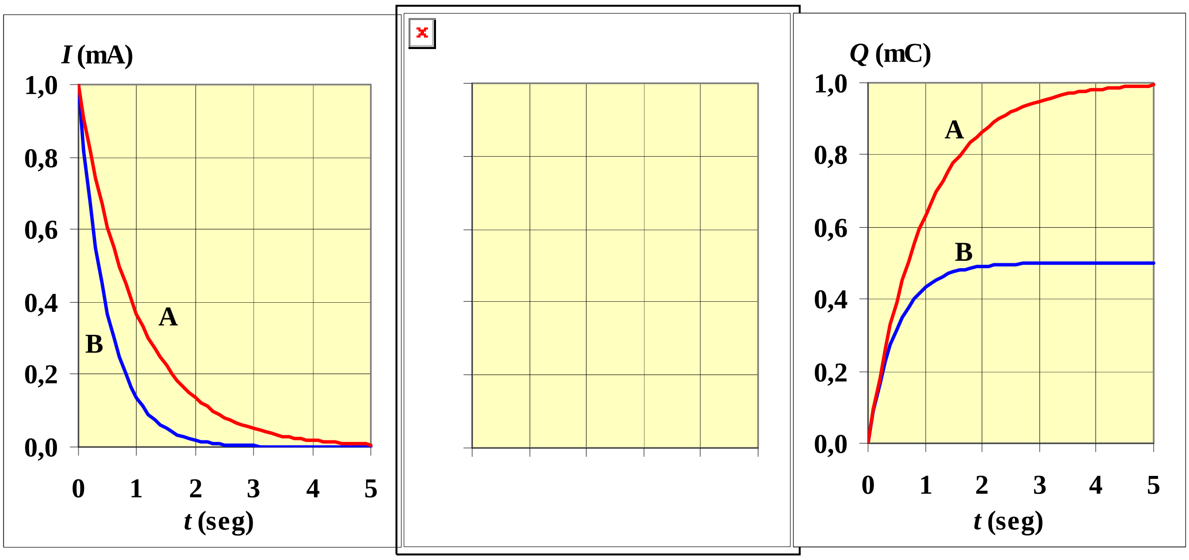


Fig.13 Dependências temporais da corrente, tensão e carga armazenada no capacitor dos circuitos da **Figs.12**.

Um exame da **Fig.13** permite extrair as seguintes observações:

- Ambos os circuitos exibem a mesma corrente inicial.
- Ambos os circuitos exibem a mesma tensão final no capacitor.
- As cargas finais nos capacitores diferem por um fator de dois.
- Tempos distintos são necessários para se atingir o equilíbrio em cada circuito.

O resultado do **Exemplo 3** sugere a seguinte dependência entre os parâmetros T_{carga} e C:

$$C\uparrow \;\Rightarrow\; T_{\text{carga}}\uparrow$$

$$C\downarrow \;\Rightarrow\; T_{\text{carga}}\downarrow$$

ou equivalentemente:



O tempo de carga do capacitor em um circuito RC é diretamente proporcional à capacitância do circuito.

As relações de proporcionalidade obtidas a partir dos **Exemplos 2** e **3** permitem estabelecer a seguinte relação:

O tempo de carga do capacitor em um circuito RC é diretamente proporcional ao produto resistência×capacitância do circuito.

Pode-se mostrar, a partir de uma análise dimensional das unidades de resistência elétrica e de capacitância, que a unidade de tempo pode ser obtida como o produto daquelas outras duas unidades. Por exemplo,

$$1\,\text{ohm} \times 1\,\text{farad} = 1\,\text{segundo}$$

Essa relação entre dimensões, juntamente com a relação de proporcionalidade existente entre o tempo de carga do capacitor e o produto *RC*, obtida anteriormente, permite definir um tempo característico *T*, denominado de **constante *RC*** do circuito, a partir da relação simples

$$T = RC \qquad (3)$$

O tempo característico *T* dado pela **Eq.(3)** é uma medida de quão rápido ou lento será o processo de carga de um capacitor em um circuito *RC*, após submetido a uma alimentação externa.

Por exemplo, a constante *RC* de um circuito formado pela combinação de um resistor de 10 kΩ em série com um capacitor de 100μF vale

$$T = 10^4\,\Omega \times 100 \times 10^{-6}\,\text{F} = 100 \times 10^{-2}\,\Omega \times \text{F} = 1\ \text{seg}$$

TEMPO DE CARGA DE UM CAPACITOR

Um capacitor ligado a uma fonte *cc* através de um resistor, estará completamente carregado após algum tempo. Esse tempo de carga T_{carga} está diretamente relacionado à constante *T*=*RC* do circuito.

Pode-se mostrar, através da **teoria dos circuitos**, que após transcorrido um tempo equivalente a 5*RC*, o capacitor de um circuito *RC* série estará 99,3% carregado. Na prática esse alto grau de carregamento pode ser considerado como sendo total, o que permite definir

$$T_{carga} = 5RC \qquad (4)$$

Por exemplo, para o circuito da **Fig.14**, o tempo total de carga do capacitor vale

$$T_{carga} = 5\times10^{-4}\ \text{F}\times10^{4}\ \Omega = 5\ \text{seg}$$

ou seja, transcorridos 5 segundos após o fechamento da chave *S*, a tensão sobre as armaduras do capacitor será praticamente de 10 V.

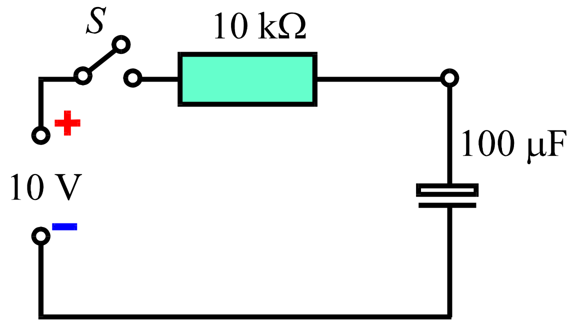


Fig.14 Exemplo de um circuito *RC* série.

Conforme já discutido anteriormente, o processo de carga de um capacitor é não-linear, ou seja, a tensão sobre o capacitor aumenta não-linearmente com o tempo. A **Tabela 1** apresenta os valores percentuais de tensão no capacitor como função do tempo.

Tabela 1 Valores percentuais da tensão no capacitor de um circuito *RC* como função do tempo.

t	V_C/V_F **(%)**
0	0
RC	63,2 %
2*RC*	86,5 %
3*RC*	95,0 %
4*RC*	98,2 %
5*RC*	99,3 % ≈ 100 %

Os percentuais listados na **Tabela 1** são obtidos com o uso da teoria dos circuitos aplicada ao circuito *RC* série, e correspondem a alguns dos pontos representados anteriormente no gráfico da **Fig.7**.

Exemplo 4: Dado o circuito mostrado na **Fig.15**, determinar:

a) A constante de tempo.

b) A tensão no capacitor após decorridas duas constantes de tempo.

c) O tempo de carga do capacitor.

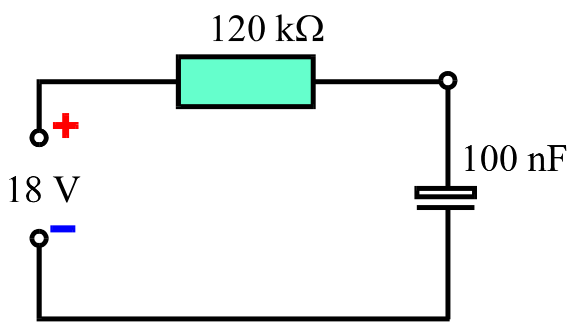


Fig.15 Circuito *RC* série referente ao **Exemplo 4**.

O circuito da **Fig.15** exibe os seguintes parâmetros:

$$V_F = 18\text{ V}$$

$$C = 100\text{ nF}$$

$$R = 120\text{ k}\Omega$$

a) A constante de tempo do circuito é obtida da **Eq.(3)**:

$$\begin{aligned} T = RC &= 120\text{k}\Omega \times 100\text{nF} \\ &= \left(120\times 10^{3}\right)\times\left(100\times 10^{-9}\right)\text{ seg} \\ &= \left(1{,}2\times 10^{5}\right)\times 10^{-7}\text{ seg} \end{aligned}$$

$$T = 1{,}2\times 10^{-2}\text{seg}$$

$$\boxed{\Rightarrow\ T = 12\text{ mseg}}$$

b) A 4ª linha da **Tabela 1** fornece

$$t = 2RC \Rightarrow \frac{V_C}{V_F} = 86{,}5\% = 0{,}865$$

resultando em

$$V_C = 0{,}865 V_F$$

$$\boxed{\Rightarrow\ V_C = 15{,}6\text{ V}}$$

c) O tempo de carga do capacitor é obtido com o uso da **Eq.(4)**:

$$T_{carga} = 5RC = 5\times 12\text{ mseg}$$

$$\boxed{\Rightarrow\ T_{carga} = 60\text{ mseg}}$$

DESCARGA DE UM CAPACITOR

Em um circuito *RC* a **descarga** refere-se ao processo através do qual cada armadura do capacitor retorna a seu estado de neutralidade elétrica.

O processo de descarga é também um processo não-linear semelhante ao processo de carga de um capacitor. Em geral o processo de descarga transcorre através de um resistor de carga, que dissipa a energia armazenada no capacitor em forma de calor, conforme ilustrado na **Fig16**.

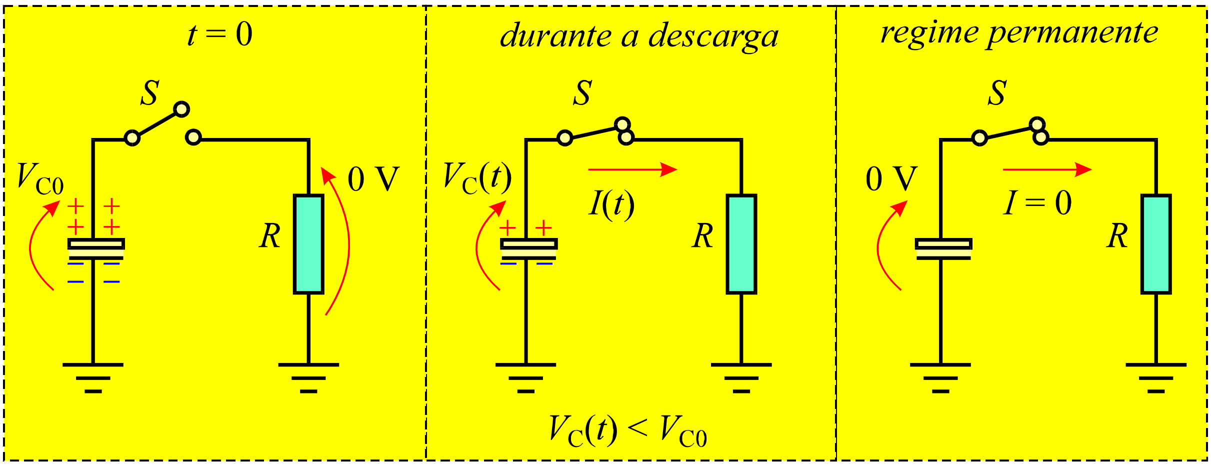


Fig.16 Processo de descarga de um capacitor através de um resistor.

O processo de descarga de um capacitor pode ser analisado com base na **Fig.17**.

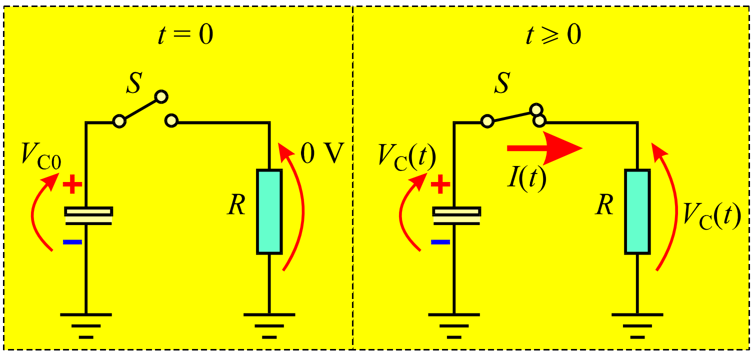


Fig.17 Circuito *RC* sem alimentação externa.

Como se pode observar na **Fig.17**, o capacitor está inicialmente carregado, apresentando uma tensão V_{C0} entre seus terminais. Com a chave *S* desligada, a queda de tensão no resistor e a corrente no circuito são nulas. Quando a chave é ligada no instante de tempo $t = 0$, a tensão V_{C0} é aplicada sobre o resistor e a corrente no circuito passa a assumir o seu valor máximo inicial

$$I_0 = \frac{V_{C0}}{R}$$

Durante um curto espaço de tempo a partir de $t = 0$, o capacitor começa a descarregar rapidamente, uma vez que a taxa de decréscimo da carga é proporcional a corrente no circuito. No entanto, o decréscimo de carga armazenada produz um decréscimo proporcional de tensão no capacitor, conforme estabelecido pela **Eq.(1)**. Como em qualquer instante de tempo $t > 0$ a tensão no capacitor e corrente no resistor estão relacionadas por

$$I(t) = \frac{V_C(t)}{R}$$

qualquer decréscimo de tensão produz um decréscimo de corrente no circuito. Isso por sua vez provoca uma diminuição na taxa de decréscimo da carga armazenada ou tensão no capacitor. Dessa forma o processo de descarga do capacitor ocorre de forma não-linear, uma vez que as taxas de decréscimo da carga armazenada ou tensão no capacitor dependem da corrente instantânea no circuito.

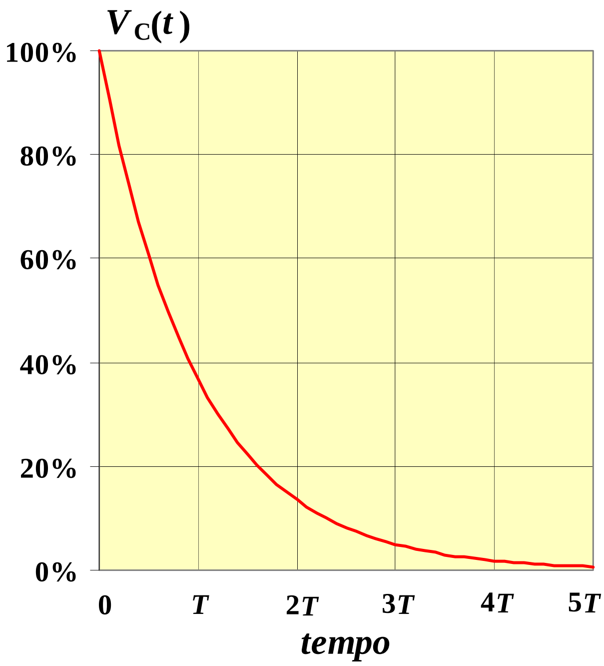


Fig.18 Dependência temporal da tensão no capacitor da **Fig.17**.

A **Fig.18** ilustra a dependência da tensão no capacitor, relativamente ao seu valor inicial, como função do tempo. A corrente no circuito, relativa ao seu valor máximo, segue uma curva semelhante. Como pode ser aí observado, imediatamente após o fechamento da chave, a tensão no capacitor, juntamente com a corrente no circuito, tendem a diminuir de uma forma não-linear até atingirem um valor nulo, correspondente ao descarregamento total do capacitor.

O processo de descarga do capacitor de um circuito *RC* série obedece aos mesmos princípios que governam o processo de carga de um circuito *RC* alimentado externamente. Conseqüentemente, o tempo de descarga T_{desc} do circuito também corresponde a 5 constantes *RC*, ou seja,

$$T_{desc} = 5RC \qquad (5)$$

A **Tabela 2** apresenta os valores percentuais de tensão no capacitor como função do tempo, durante o processo de descarga.

Tabela 2 Percentuais da tensão no capacitor de um circuito *RC* série durante a descarga.

t	V_C/V_{C0} (%)
0	0
RC	36,8 %
$2RC$	13,5 %
$3RC$	5,0 %
$4RC$	1,8 %
$5RC$	0,7 % ≈ 0 %

<u>Exemplo 5:</u> Dado o circuito mostrado na **Fig.19**, determinar:

a) A constante de tempo do circuito.

b) A tensão no capacitor após duas constantes de tempo.

c) O tempo de descarga do capacitor após o fechamento da chave.

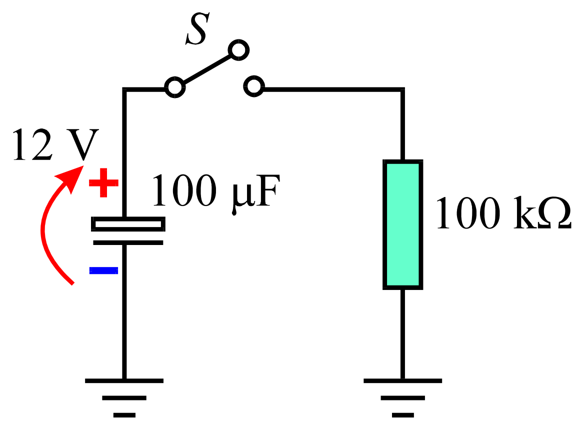


Fig.19 Circuito *RC* série referente ao **Exemplo 5**.

O circuito da **Fig.19** exibe os seguintes parâmetros,

$$C = 100\ \mu\text{F}$$
$$R = 100\ \text{k}\Omega$$

a) A constante de tempo do circuito é obtida da **Eq.(3)**:

$$T = RC = 100\text{k}\Omega \times 100\mu\text{F}$$
$$= \left(100 \times 10^{3}\right) \times \left(100 \times 10^{-6}\right)\ \text{seg}$$
$$= 10^{5} \times 10^{-4}\ \text{seg}$$

$$\boxed{\Rightarrow\ T = 10\ \text{seg}}$$

b) A 4ª linha da **Tabela 2** fornece

$$t = RC \Rightarrow \frac{V_C}{V_{C0}} = 13{,}5\% = 0{,}135$$

resultando em

$$V_C = 0{,}135 V_{C0} = 0{,}135 \times 12 \text{ V}$$

$$\boxed{\Rightarrow V_C = 1{,}62 \text{ V}}$$

c) O tempo de descarga do capacitor é obtido com o uso da **Eq.(5)**:

$$T_{desc} = 5RC = 5 \times 10 \text{ seg}$$

$$\boxed{\Rightarrow \; T_{desc} = 50 \text{ seg}}$$

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Qual a relação existente entre tensão e carga armazenada na armadura positiva de um capacitor?

2. Qual é a carga armazenada na armadura positiva de um capacitor de 1 μF submetido a uma tensão de 5 V? E na armadura negativa?

3. Qual é a expressão para a constante de tempo de um circuito *RC* série?

4. Repita o **Exemplo 1** admitindo V_F = 20 V, *R* = 50 Ω e *C* = 10μF.

5. Para um circuito *RC* série alimentado externamente, qual é a expressão para o tempo de carga do capacitor?

6. Se um capacitor carregado for conectado a um resistor, formando um circuito fechado, qual é a constante de tempo e o tempo de descarga?

7. Para o **Exemplo 5**, admitindo *C* = 200μF e *R* = 50 kΩ:

   (a) qual é a tensão no capacitor após três constantes de tempo?

   (b) qual é a corrente no circuito após 3 constantes de tempo?

   (c) qual é o tempo de descarga do capacitor?

BIBLIOGRAFIA

SENAI/DN, Reparador de Circuitos Eletrônicos, Eletrônica Básica I, Rio de Janeiro. (Coleção Básica SENAI, Módulo I).

VAN VALKENBERG, NOOGER & NEVILLE, Eletricidade Básica vol.3, Rio de Janeiro, Freitas Bastos (1960)

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Introdução

Circuitos *RC* são muito utilizados em sistemas *ca* com a finalidade de proporcionar defasagens entre sinais elétricos bem como para facilitar o acoplamento entre estágios amplificadores.

Existe no entanto uma aplicação importante dos circuitos *RC* em equipamentos de instrumentação e controle industrial. Nesses equipamentos o resistor e o capacitor compõem circuitos integradores e diferenciadores que recebem pulsos na entrada e fornecem sinais de disparo para o controle de motores, válvulas, solenóides, relés etc.

Este fascículo tem por objetivo apresentar e discutir os princípios de funcionamento dos circuitos integradores e diferenciadores que são elementos fundamentais utilizados na análise dos circuitos de controle industrial.

Para a boa compreensão do conteúdo e desenvolvimento das atividades contidas neste fascículo, o leitor deverá estar familiarizado com os conceitos relativos a:

- Dinâmica de carga e descarga em capacitores.
- Amplificador operacional.

Circuito integrador e diferenciador

PULSOS

O termo **pulso** pode ser usado para designar uma forma de onda tendo uma componente que se repete como função do tempo, conforme mostrado na **Fig1a**. Entretanto, é comum aplicar esse termo em referência a formas de ondas retangulares, do tipo mostrado na **Fig.1b**.

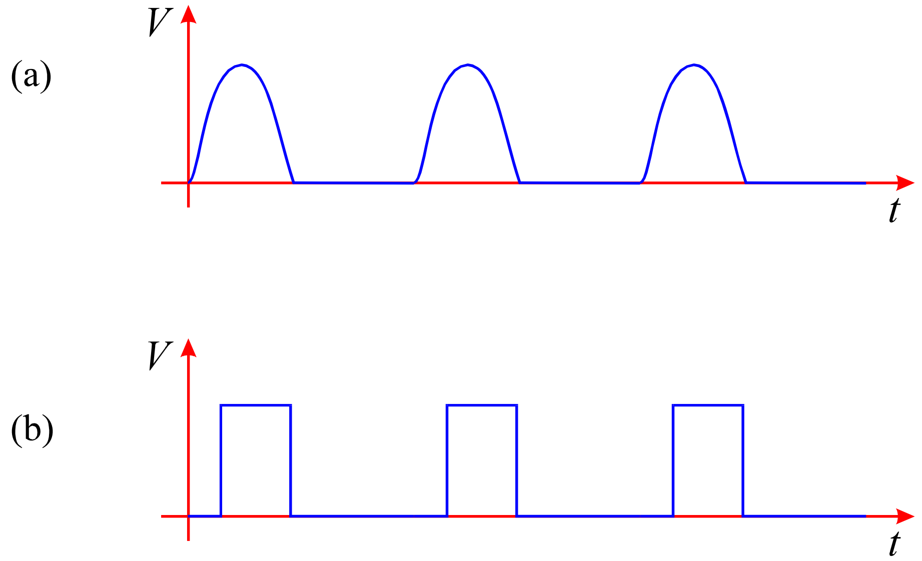


Fig.1 Formas de onda:**(a)** arbitrária, **(b)** retangular.

Pulsos podem ser caracterizados pelos seguintes parâmetros:

- Ciclo
- Freqüência.
- Período.
- Largura do pulso.
- Ciclo de trabalho.
- Tempos de subida e descida.
- Componente *cc*.

CICLO

Um sinal periódico consiste na reprodução no tempo de uma porção básica do sinal. O intervalo de tempo que contém essa porção básica delimita um ciclo do sinal periódico, conforme ilustrado no gráfico da **Fig.2**.

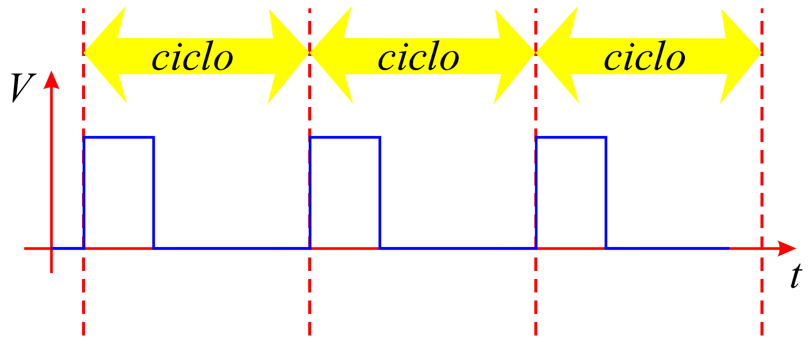


Fig.2 Ciclos associados a uma seqüência de pulsos.

FREQÜÊNCIA

A freqüência *f* de uma seqüência de pulsos é definida como sendo o número de ciclos por segundo. No exemplo da **Fig.3**, existem 10 ciclos em um intervalo de tempo de 1 segundo ou equivalentemente 1 ciclo ocorrendo em um intervalo de tempo de 0,1 seg. A freqüência associada à seqüência de pulsos vale

$$f = \frac{10}{1 \text{ seg}} = \frac{1}{0{,}1 \text{ seg}} = 10 \text{ Hz}$$

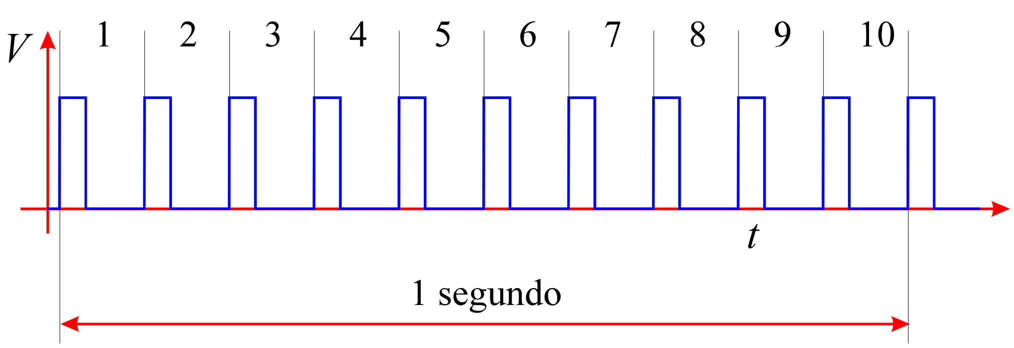


Fig.3 Seqüência de pulsos de freqüência 10 Hz.

PERÍODO

Um período de uma seqüência de pulsos é o intervalo de tempo que contém um ciclo da forma de onda. O período T está relacionado com a freqüência pela relação

$$T = \frac{1}{f} \tag{1}$$

Para a seqüência de pulsos da **Fig.3**, f = 10 Hz e da **Eq.(1)**,

$$T = 1/10 = 0{,}1 \text{ seg} = 100 \text{ mseg}$$

LARGURA DE PULSO

A largura de pulso τ corresponde ao intervalo de tempo ocupado por cada pulso, conforme mostrado na **Fig.4**.

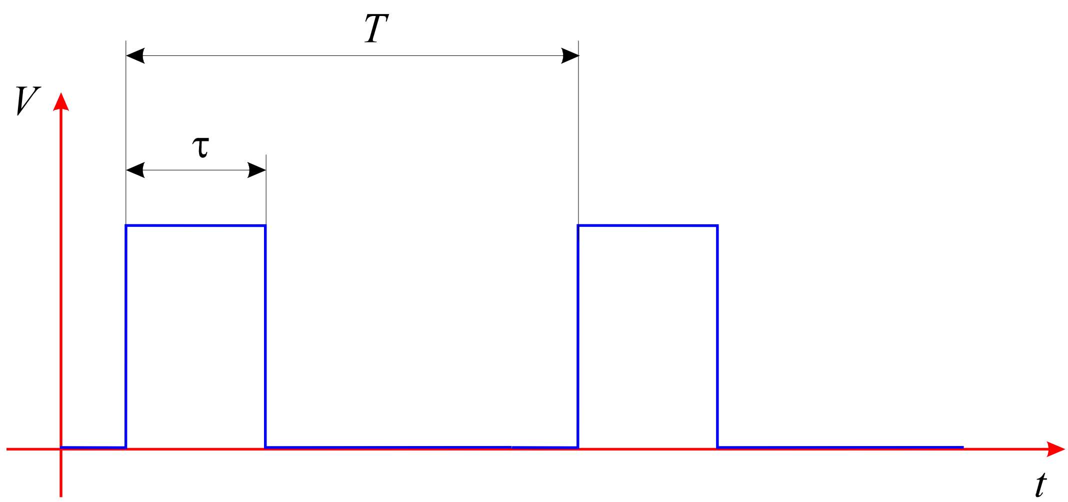


Fig.4 Seqüência de pulsos retangulares e definição da largura de pulso.

CICLO DE TRABALHO

Ciclo de trabalho ν, originado do termo inglês *duty cycle*, é definido como a razão entre a largura de pulso e o período associado à seqüência de pulsos. De acordo com essa definição tem-se que

$$\nu = \frac{\tau}{T} \tag{2}$$

Por exemplo, para a seqüência de pulsos mostrada na **Fig5a**, τ = 0,5 mseg e T= 1,25 mseg. O ciclo de trabalho vale portanto

$$\nu = \frac{0{,}5}{1{,}25} = \frac{1}{5} = 0{,}2$$

Para o caso da **Fig.5b** o ciclo de trabalho vale

$$\nu = \frac{1\ \text{mseg}}{2\ \text{mseg}} = \frac{1}{2} = 0{,}5$$

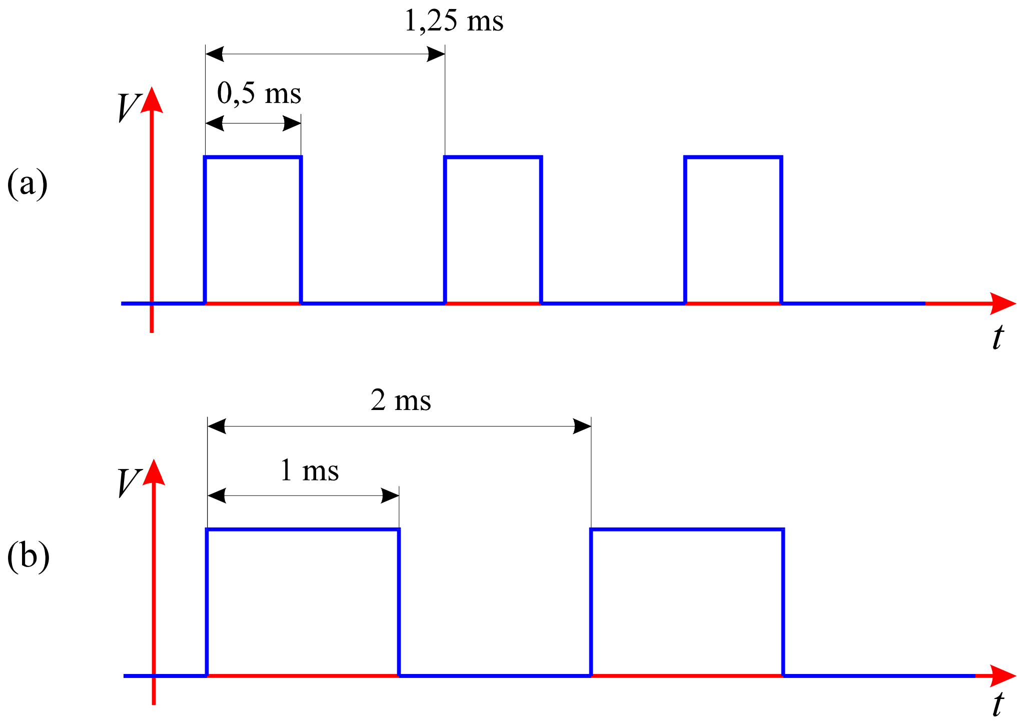


Fig.5 Seqüência de pulsos: **(a)** assimétrica, **(b)** simétrica.

A forma de onda mostrada na **Fig.5b** é constituída de **pulsos simétricos**, isto é, pulsos cuja largura corresponde exatamente a meio período, tendo portanto um ciclo de trabalho ν=1/2. Quando a seqüência de pulsos exibe ν≠1/2, como no caso da **Fig.5a**, diz-se que a seqüência é formada por **pulsos assimétricos**.

TEMPO DE SUBIDA E DESCIDA

Cada pulso de uma seqüência exibe duas transições que ocorrem nas bordas do pulso, conforme ilustrado na **Fig.6**. A **subida** está associada a uma transição positiva e a **descida**, a uma transição negativa, conforme indicado na **Fig.6**.

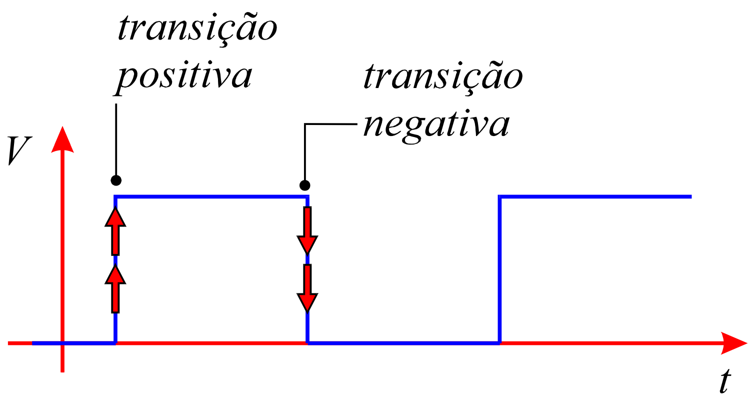


Fig.6 Transições associadas aos pulsos de uma seqüência.

Um exame mais detalhado do formato do pulso indica que suas transições não ocorrem de forma vertical e abrupta. Como se pode observar na **Fig.7**, existem tempos de transição associados à subida e à descida do pulso.

Define-se o **tempo de subida (** t_s **)** como aquele necessário à ocorrência de uma transição positiva entre os limites correspondentes a 10% e 90% do valor máximo da transição, conforme mostrado na **Fig.7**.

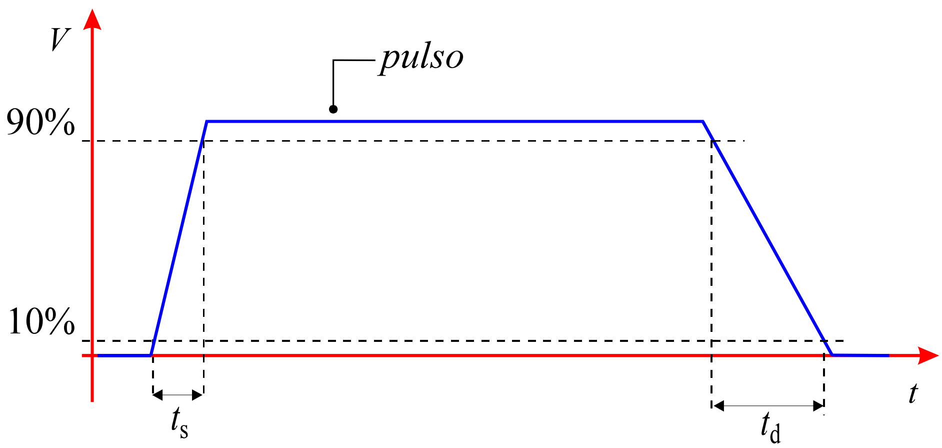


Fig.7 Tempos de subida e de descida associados às transições de um pulso.

Na **Fig.7**, o **tempo de descida (** t_d **)** é aquele necessário à ocorrência de uma transição negativa entre os limites correspondentes a 90% e 10% do valor máximo da transição.

Um pulso retangular ideal seria aquele exibindo transições verticais, ou seja, transições com $t_s = t_d = 0$. Entretanto esse tipo de transição nunca ocorre, pois nenhum evento físico pode variar abruptamente. Pode-se no entanto minimizar os valores de t_s e t_d, de forma a garantir o bom funcionamento de dispositivos eletrônicos que operem com formas de onda pulsadas.

COMPONENTE *cc*

A componente *cc* de uma seqüência periódica de pulsos retangulares representa o valor médio do sinal calculado em um período T. Para a seqüência de pulsos retangulares mostrada na **Fig.8** o valor médio do sinal pode ser calculado diretamente, notando que durante uma fração τ/T do período o sinal se mantém no nível V_{p1} e durante uma fração$(T-\tau)/T$ do período o sinal se mantém no nível V_{p2}. O valor médio ou componente *cc* do sinal é portanto

$$V_{cc} = \frac{\tau}{T} V_{p1} + \frac{T-\tau}{T} V_{p2}$$

ou equivalentemente

$$V_{cc} = \frac{1}{T}\left(\tau V_{p1} + (T-\tau)V_{p2}\right) \tag{3}$$

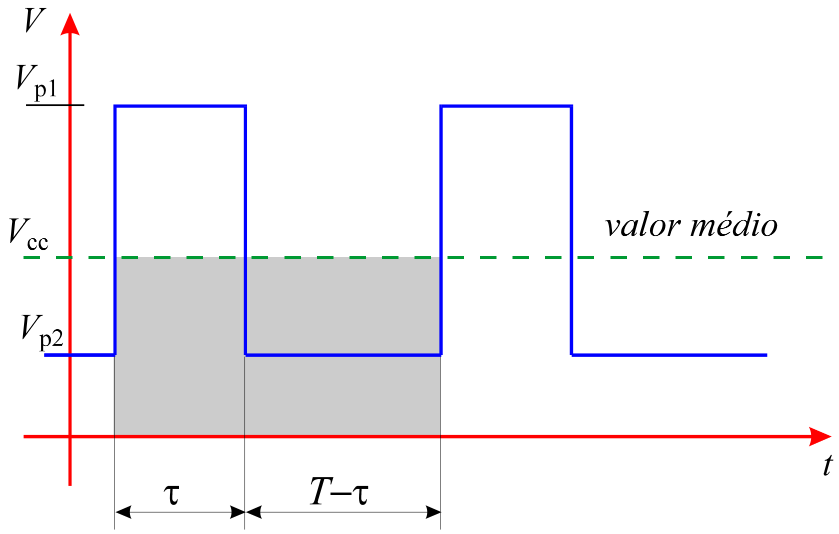


Fig.8 Valor médio associado a uma seqüência de pulsos.

O valor médio definido pela **Eq.(3)** tem uma interpretação simples. Para isso basta colocar a **Eq.(3)** na forma

$$TV_{cc} = \tau V_{p1} + (T-\tau)V_{p2}$$

Essa última expressão em conjunto com a **Fig.8** permite extrair as seguintes observações:

- O primeiro membro da expressão representa a área do retângulo sombreado na **Fig.8**.
- O segundo membro é a soma das áreas dos retângulos de dimensões $V_{p1}\times\tau$ e $V_{p2}\times(t-\tau)$.

Ou seja, o valor médio ou componente *cc* do sinal representa a altura de um retângulo de área igual àquela ocupada pelos dois pulsos que estão contidos no período *T*. Note-se que se existirem pulsos negativos, sinais negativos devem ser atribuídos às áreas a eles associadas e portanto a componente *cc* poderá ser negativa ou mesmo nula, conforme ilustra o exemplo a seguir.

Exemplo 1: Determinar a componente *cc* para cada seqüência de pulsos mostrada na **Fig.9**.

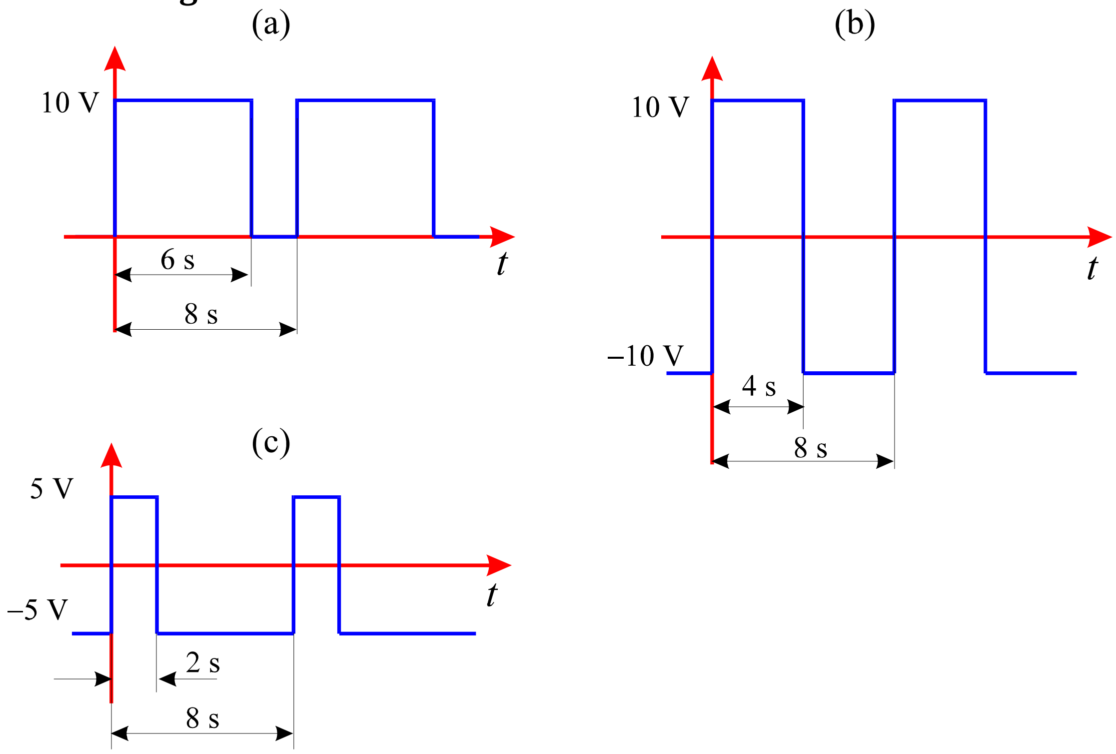


Fig.9 Seqüências de pulsos para o **Exemplo 1**.

Para o caso da **Fig.9a**, a **Eq.(3)** fornece

$$V_{cc} = \frac{1}{8}\left(6\times 10 + (8-6)\times 0\right) = \frac{1}{8}\times 60 = \frac{60}{8}$$

$$\Rightarrow \quad V_{cc} = 7{,}5\ \text{V}$$

Para a seqüência de pulsos mostrada na **Fig.9b** tem-se que

$$V_{cc} = \frac{1}{8}\left[4\times 10 + (8-4)\times(-10)\right] = \frac{1}{8}(40-40)$$

$$\Rightarrow \quad V_{cc} = 0\ \text{V}$$

Finalmente, para a seqüência de pulsos mostrada na **Fig.9c** obtém-se

$$V_{cc} = \frac{1}{8}\left[5\times 2 + (8-2)\times(-5)\right] = \frac{1}{8}(10-30) = -\frac{20}{8}$$

$$\Rightarrow \quad V_{cc} = -2{,}5\ \text{V}$$

Um caso particular da **Eq.(3)** ocorre quando o sinal se anula em uma porção do período, conforme ilustrado na **Fig.10**.

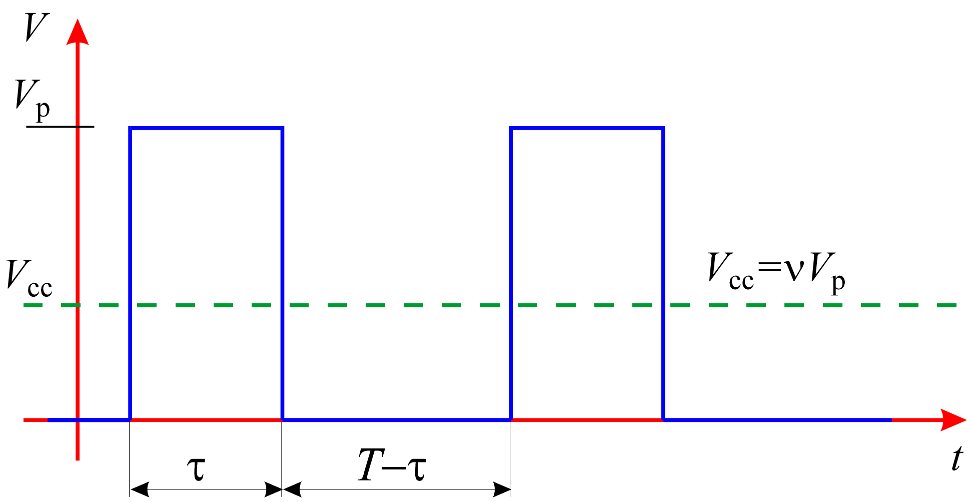


Fig.10 Seqüência de pulsos intercalados por valores nulos do sinal.

Nessa situação a **Eq.(3)** fornece

$$V_{cc} = \frac{1}{T}\left(\tau V_p + (T-\tau)\times 0\right) = \frac{\tau}{T}V_p$$

e utilizando a definição dada pela **Eq.(2)** resulta em

$$V_{cc} = \nu V_p \qquad (4)$$

A **Eq.(4)** indica que nesse caso particular, a componente *cc* se reduz ao produto (ciclo de trabalho)×(altura do pulso).

CIRCUITO INTEGRADOR

Para que se possa entender o funcionamento do circuito integrador é necessário que se tenha, inicialmente, uma noção matemática da operação de **integração.**

A operação matemática de integração é freqüentemente utilizada como ferramenta de cálculo de área de figuras regulares e irregulares, possibilitando a determinação da área sob uma curva de forma arbitrária. A **Fig.11** ilustra alguns exemplos de áreas calculadas utilizando o processo de integração.

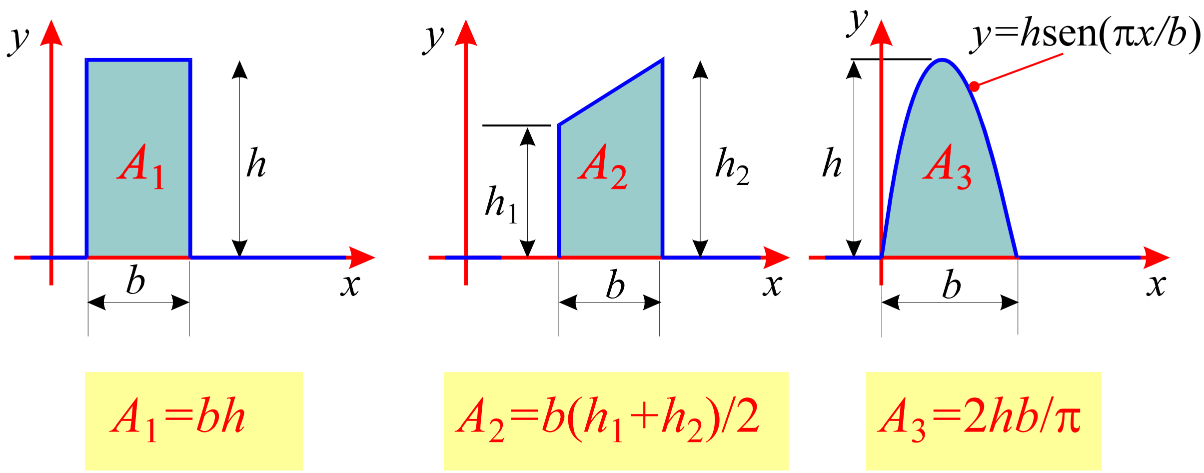


Fig.11 Exemplos de áreas calculadas através do processo de integração.

Em qualquer um dos exemplos mostrados na **Fig.11**, a área sob a curva é sempre proporcional ao produto de uma dimensão horizontal e outra vertical.

Esses conceitos básicos podem ser aplicados ao circuito eletrônico denominado de integrador. Um **circuito integrador** fornece na saída uma tensão que é proporcional à área sob a curva que define o sinal. A dimensão horizontal associada à área representa o tempo de aplicação do sinal na entrada e a dimensão vertical é associada à amplitude do sinal.

Para ilustrar a operação de um circuito integrador, suponha que o bloco mostrado na **Fig.12** represente um circuito integrador que produza na saída uma tensão proporcional à integral do sinal de entrada. Essa relação de proporcionalidade é definida pela constante k mostrada da **Fig.12**.

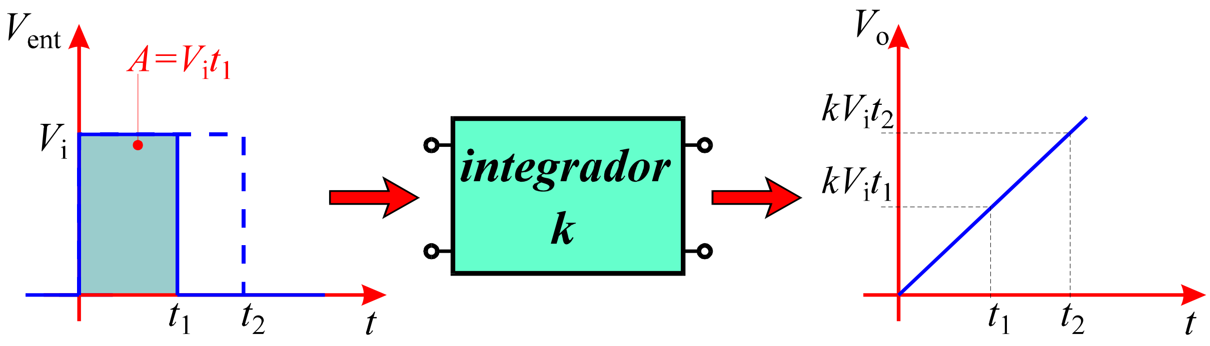


Fig.12 Bloco integrador submetido a um sinal de entrada constante.

Admitindo-se que o sinal de entrada na **Fig.12** seja aplicado em t = 0, decorrido um tempo t_1 a área sob a curva que define o sinal vale

$$A(t_1) = V_i t_1$$

e o circuito integrador produziria na saída um sinal

$$V_o(t_1) = kV_i t_1$$

Em um tempo $t_2 > t_1$ o sinal de saída passa a ser

$$V_o(t_2) = kV_i t_2$$

e assim sucessivamente. Para um tempo t arbitrário, o sinal de saída é dado por

$$V_o(t) = kV_i t$$

Essa última expressão mostra que a saída do circuito integrador aumenta linearmente com o tempo a partir da aplicação de um sinal de entrada constante em t=0, conforme mostrado na **Fig.12**.

Verifica-se que um circuito *RC*, do tipo mostrado na **Fig.13** executa, sob determinadas condições, uma função semelhante àquela de um circuito integrador. Isso pode ser verificado a partir da curva de carga do capacitor mostrada na **Fig.13**.

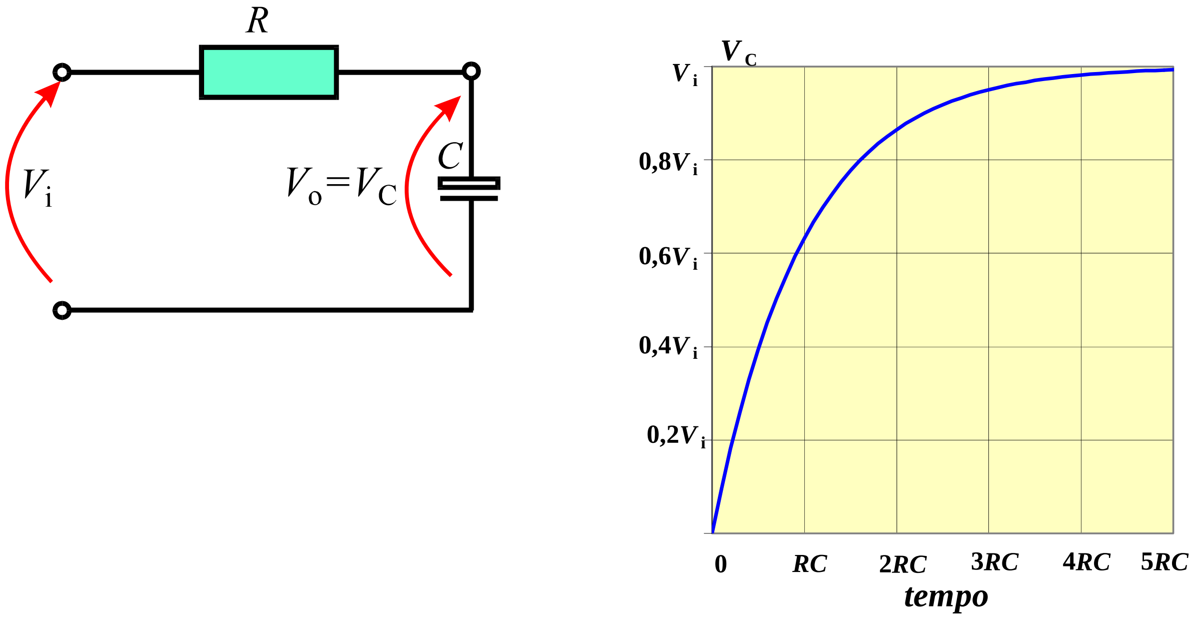


Fig.13 Circuito *RC* e curva de carga do capacitor.

Analisando-se com mais detalhe a região do gráfico correspondente a t<0,5RC, verifica-se que nessa região a tensão no capacitor aumenta de forma praticamente proporcional ao tempo, conforme mostrado na **Fig.14**.

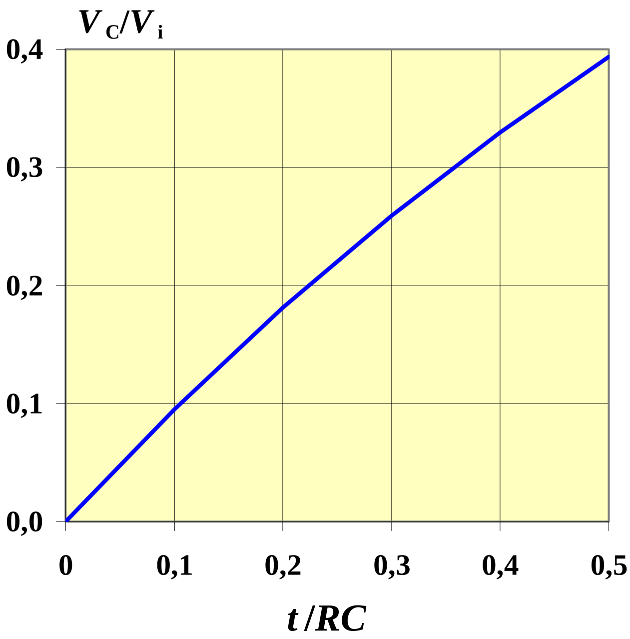


Fig.14 Detalhe da curva de carga do capacitor na região t < 0,5RC.

Pode-se mostrar que na região t < 0,5RC, a dependência temporal do parâmetro V_C de um circuito RC submetido a uma tensão V_i, é aproximadamente

$$V_C = \frac{1}{RC} V_i t \qquad (5)$$

Dessa forma, a aplicação de um pulso de tensão de altura V_p e de largura $\tau < 0{,}5RC$, na entrada de um circuito *RC*, conforme ilustrado na **Fig.15**, resulta em uma saída dada por

$$V_o = \frac{1}{RC} V_p t$$

onde *t* é o tempo decorrido após a aplicação do pulso.

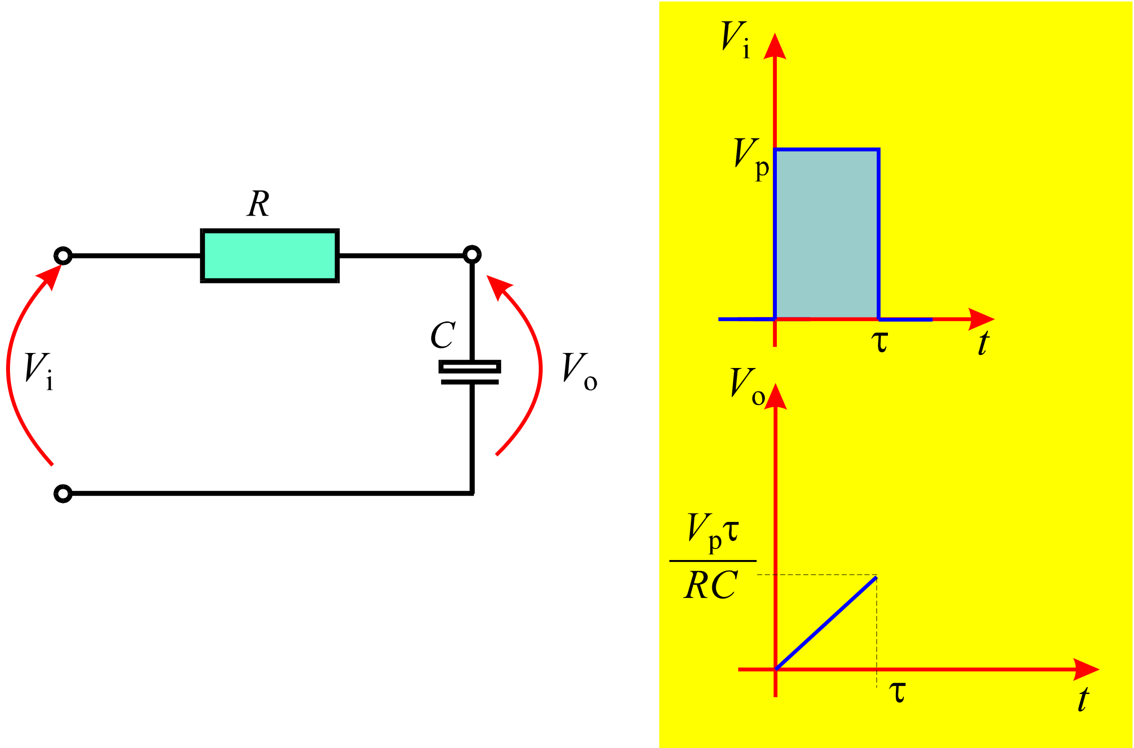


Fig.15 Aplicação de um pulso na entrada de um circuito *RC* e tensão de saída correspondente.

CIRCUITO DIFERENCIADOR

O circuito diferenciador é essencialmente um detetor da taxa de variação de sinal com relação ao tempo. Nesse tipo de circuito, a tensão de saída é proporcional ao grau de variação do sinal e inversamente proporcional ao intervalo de tempo em que ocorre essa variação.

A **Fig.16** ilustra um sinal que varia de V_i a V_f do tempo t_i ao tempo t_f. A variação do sinal é portanto

$$\Delta V = V_f - V_i$$

e o intervalo de tempo referente a essa variação vale

$$\Delta t = t_f - t_i$$

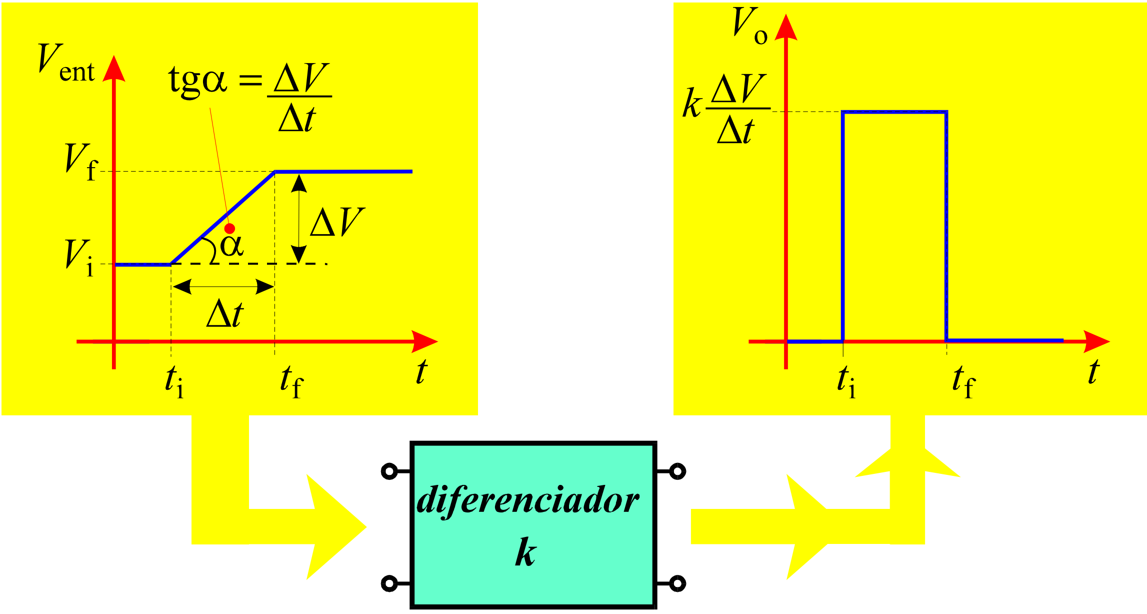


Fig.16 Bloco diferenciador submetido a uma variação de sinal.

Esse sinal aplicado à entrada de um circuito diferenciador produziria um valor nulo na saída até a ocorrência da variação de sinal. No instante de tempo t_i, a saída do diferenciador indicaria a existência da variação de sinal fornecendo uma tensão dada por

$$V_o = k\frac{\Delta V}{\Delta t} \tag{6}$$

onde k é um constante.

Para $t > t_f$ a saída do diferenciador forneceria uma tensão nula, indicando a ausência de variações do sinal, conforme mostrado na **Fig.16**.

A fração no segundo membro da **Eq.(6)** representa **a taxa de variação do sinal no tempo**, ou equivalentemente, a declividade da função representando o sinal, no tempo t_i, como indicado na **Fig.16**.

A aplicação mais comum do diferenciador é na detecção das bordas de subida ou descida de pulsos retangulares. Conforme mostrado na **Fig.17**, o circuito diferenciador detecta essas variações, produzindo um pico positivo durante a transição positiva e outro negativo durante a transição negativa do pulso.

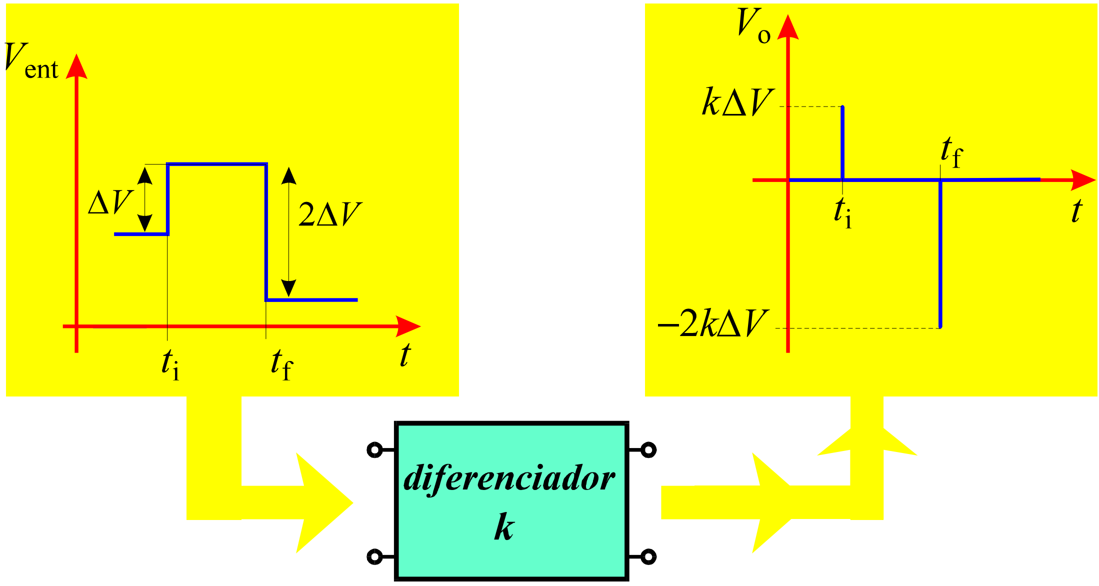


Fig.17 Circuito diferenciador submetido a um pulso de sinal.

Se a tensão de entrada varia linearmente com o tempo, conforme ilustrado na **Fig.18**, tem-se que a taxa de variação do sinal de entrada no tempo é constante, ou seja,

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \text{constante}$$

e como indica a **Eq.(6)** o circuito diferenciador fornece uma saída constante, como ilustrado na **Fig.18**.

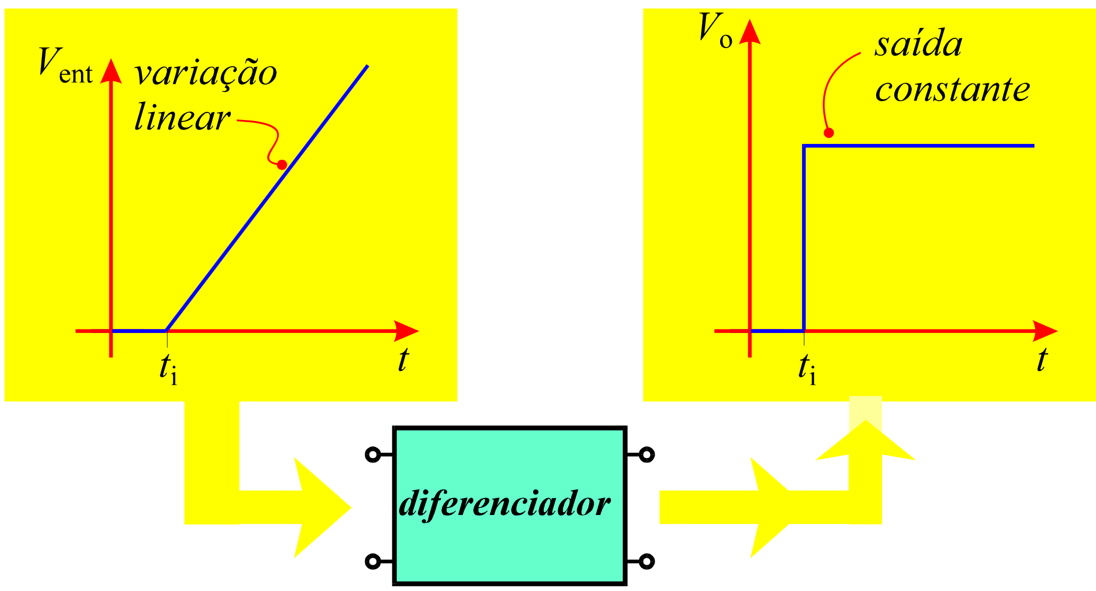


Fig.18 Circuito diferenciador submetido a uma variação linear de sinal.

Uma inspeção nas operações realizadas por um integrador e um diferenciador indica que esses circuitos realizam operações inversas, conforme ilustrado na **Fig.19**.

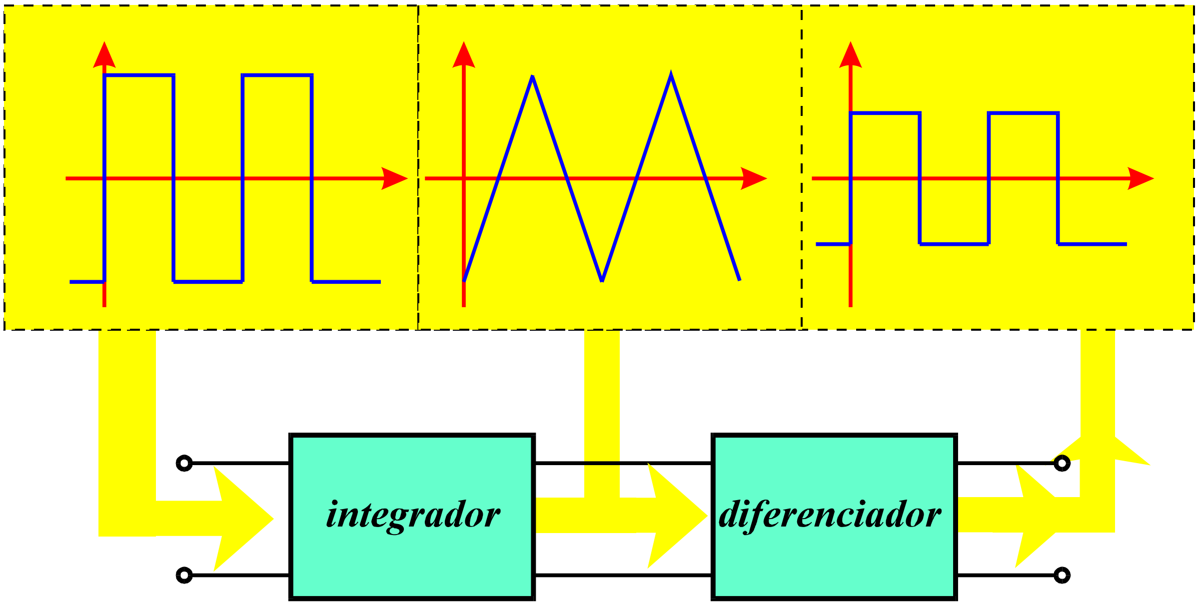


Fig.19 Comparação entre as operações realizadas por um integrador e um diferenciador.

O circuito *RC* série também pode ser utilizado como circuito diferenciador, desde que sejam atendidas algumas condições. Uma das condições requer que os terminais de saída correspondam aos terminais do resistor, conforme mostrado na **Fig.20**.

A análise do funcionamento do circuito é feita com base na **Fig.21** que mostra a aplicação de um sinal de entrada que varia subitamente no tempo t_i.

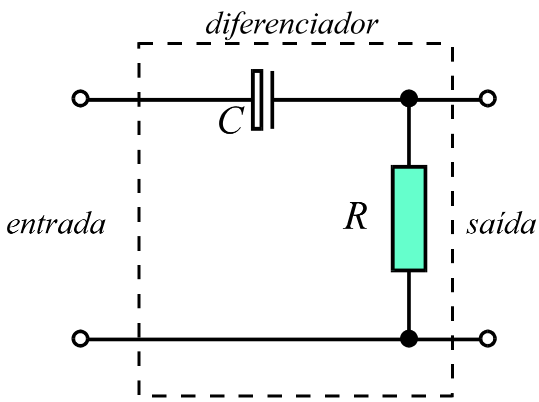


Fig.20 Circuito *RC* série configurado como diferenciador.

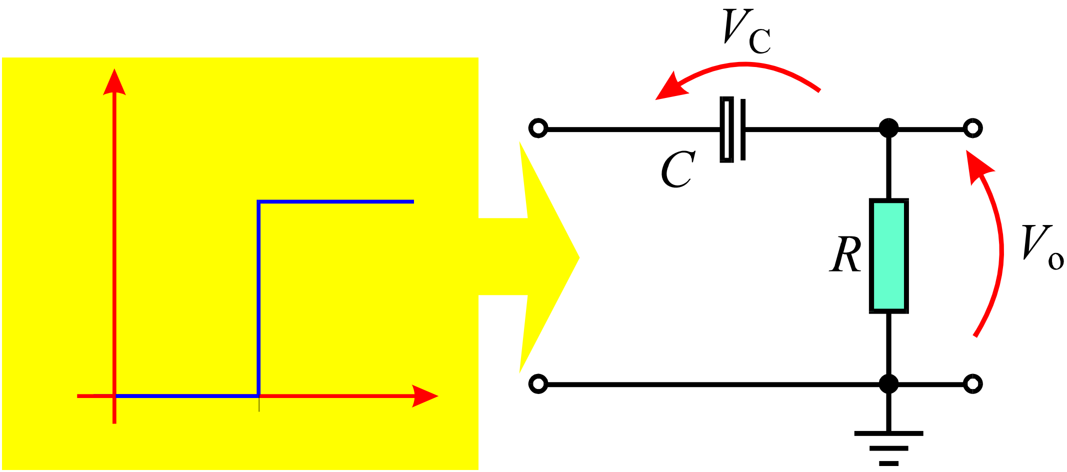


Fig.21 Circuito *RC* série configurado para operação como diferenciador.

Como se pode observar na **Fig.22a**, enquanto a tensão de entrada permanece nula, o mesmo ocorre na saída. No momento em que a tensão de entrada atinge o valor V_i no tempo t_i o capacitor inicia um processo de carga. **Se a constante de tempo *RC* for suficientemente pequena** , o capacitor se carregará rapidamente, como indicado na **Fig.22b**. Como durante o carregamento circula corrente, surge uma queda de tensão sobre o resistor apenas durante um **curto intervalo de tempo**. Como se pode observar na **Fig.22c**, na saída do circuito aparece apenas um pico de tensão indicativo de uma variação positiva na tensão de entrada. Enquanto não houver nova variação na tensão de entrada, a tensão de saída permanecerá nula.

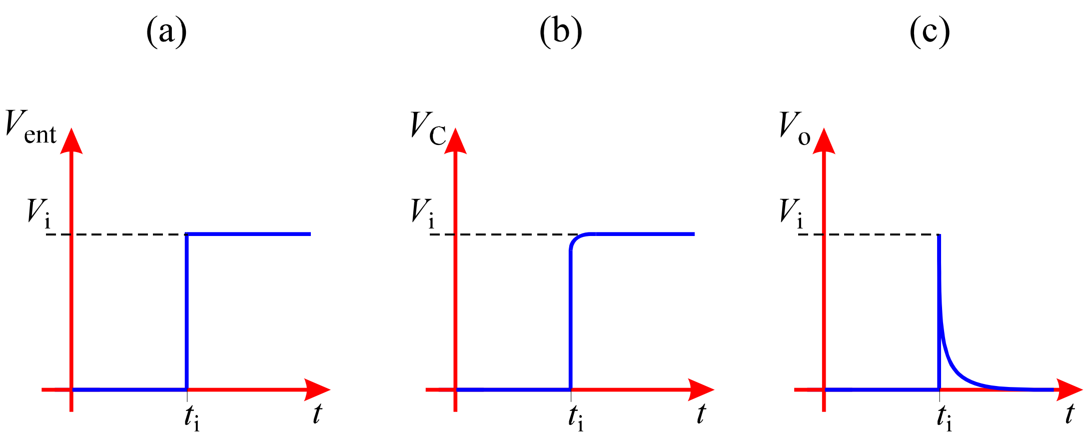


Fig.22 Sinais elétricos no circuito *RC* da **Fig.21**: **(a)** Tensão de entrada, **(b)** tensão no capacitor e **(c)** tensão de saída do circuito.

Se a tensão de entrada retornar a zero no tempo t_f, o capacitor se descarregará rapidamente através do resistor, gerando um novo pico de tensão na saída. Como a corrente de descarga circula em sentido oposto ao da carga, o pico de tensão nesse caso será negativo, como mostrado na **Fig.23**.

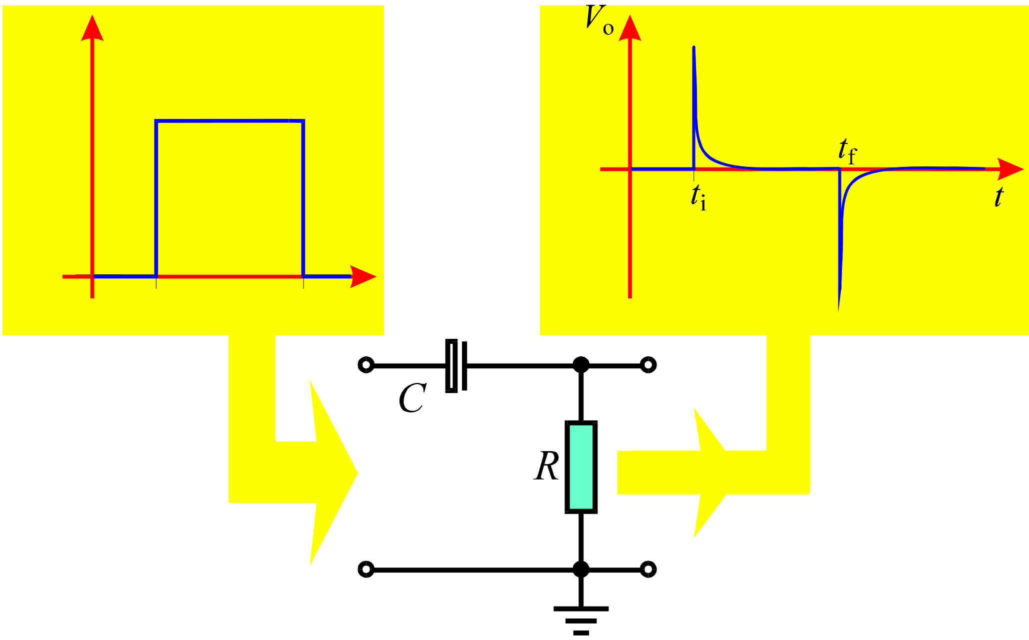


Fig.23 Tensão de saída para o circuito *RC* da **Fig.21** após a aplicação de um pulso de sinal.

Verifica-se, então, que a tensão de saída existe apenas quando ocorrem variações de tensão na entrada do circuito. Nota-se também que a tensão de saída exibe o sinal correspondente ao sentido de variação do sinal de entrada.

A partir da discussão anterior pode-se estabelecer a condição que deve ser imposta para que o circuito *RC* funcione como diferenciador:

Um circuito RC série quando configurado como circuito diferenciador tem de ser projetado com uma constante RC pequena. Na prática a constante RC deve ser no máximo 1/10 da menor largura de pulso aplicado à entrada do circuito.

INTEGRADOR E DIFERENCIADOR COM AMPLIFICADOR OPERACIONAL

Os circuitos integradores e diferenciadores passivos (que contêm apenas resistores e capacitores) apresentam as seguintes limitações práticas:

Integrador: Só opera satisfatoriamente durante a primeira meia constante de tempo de ocorrência do sinal, onde a carga e a tensão no capacitor variam linearmente com o tempo.

Diferenciador: A constante de tempo tem de ser, no máximo, 1/10 da menor largura de pulso do sinal aplicado à entrada. Além disso, verifica-se que a ligação de uma carga à saída altera o comportamento do circuito, pois modifica a constante *RC* do circuito, conforme ilustrado na **Fig.24**.

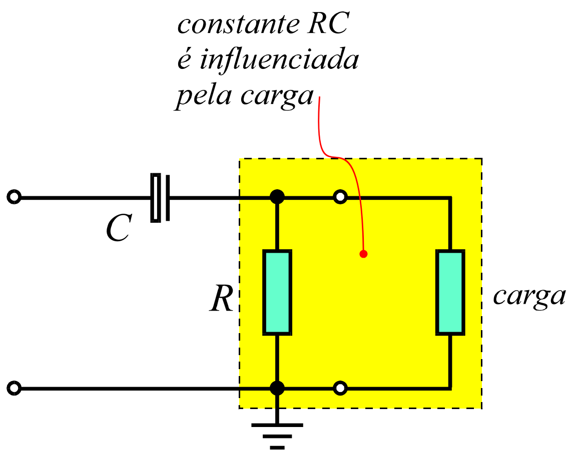


Fig.24 Influência de uma carga externa no circuito *RC* diferenciador.

Essas limitações podem ser contornadas com o uso de um componente ativo, tal como o amplificador operacional, conforme examinado a seguir.

INTEGRADOR COM AMPLIFICADOR OPERACIONAL

Para analisar o funcionamento do circuito integrador com *AO*, convém considerar duas importantes características associadas a este componente:

- Ambas as entradas de um *AO* se mantêm praticamente no mesmo potencial.
- A corrente injetada em cada entrada de um *AO* é praticamente nula.

Essas características estão representadas na **Fig.25**.

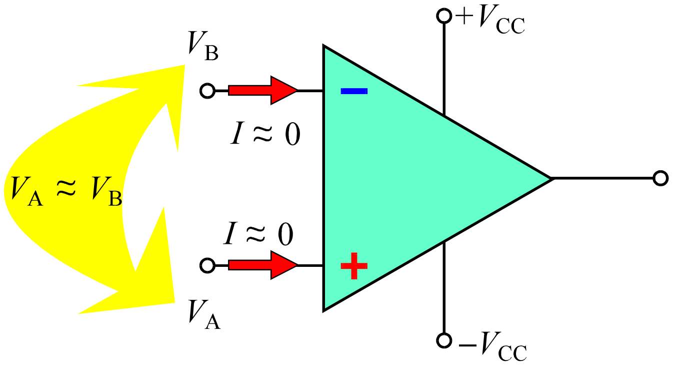


Fig.25 Representação de duas características de entrada de um *AO*.

A partir dessas considerações, a análise do integrador com *AO* é feita com base no diagrama de circuito mostrado na **Fig.26**, onde se admite a aplicação de um pulso retangular na entrada do circuito.

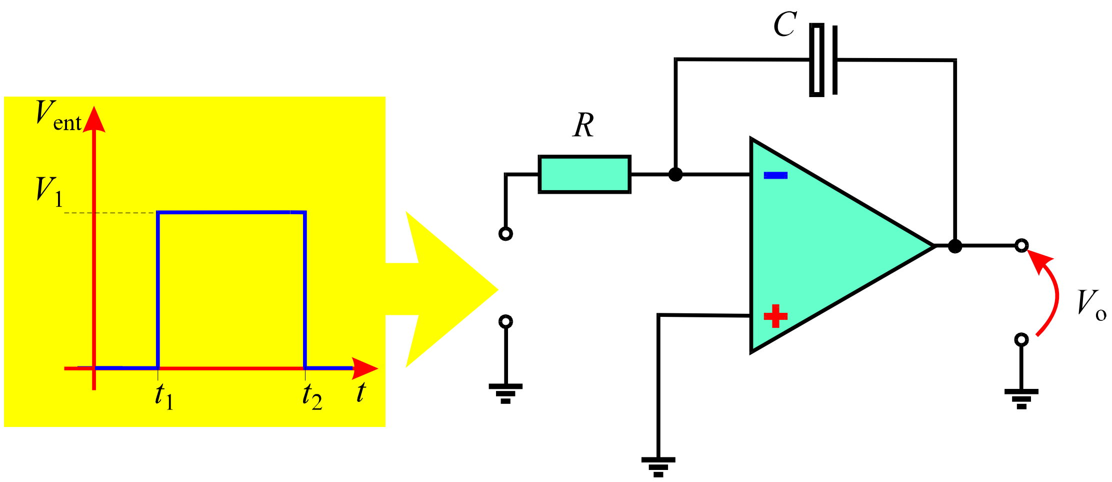


Fig.26 Circuito integrador com *AO*.

No intervalo de tempo $0 < t < t_1$, a tensão de entrada é nula. Considerando-se o *AO* corretamente ajustado, a tensão de saída também é nula.

Em $t = t_1$ a tensão de entrada aumenta para o valor V_1, permanecendo constante até o instante de tempo $t=t_2$. Durante o intervalo de tempo $t_1 < t < t_2$ a tensão V_1 permanece totalmente aplicada entre os terminais do resistor, uma vez que um de seus terminais corresponde ao terra virtual do *AO*, conforme mostrado na **Fig.27**.

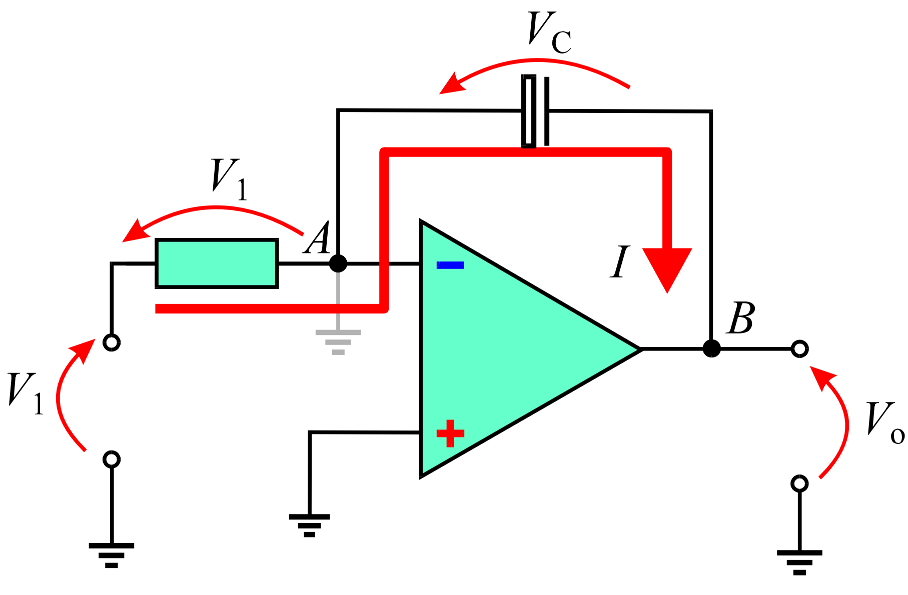


Fig.27 Operação do integrador no intervalo de tempo $t_1 < t < t_2$.

Sendo nula a corrente injetada no terminal inversor, circula através do resistor e do capacitor uma corrente dada por

$$I = \frac{V_1}{R}$$

É importante observar que o terra virtual na entrada inversora garante que essa corrente se mantenha constante durante a permanência do sinal de entrada no valor V_1. O capacitor começa a se carregar devido à circulação de corrente. Como a corrente é constante, a carga armazenada aumenta linearmente com o tempo, o mesmo ocorrendo com a tensão entre os terminais do capacitor, conforme ilustrado na **Fig.28**.

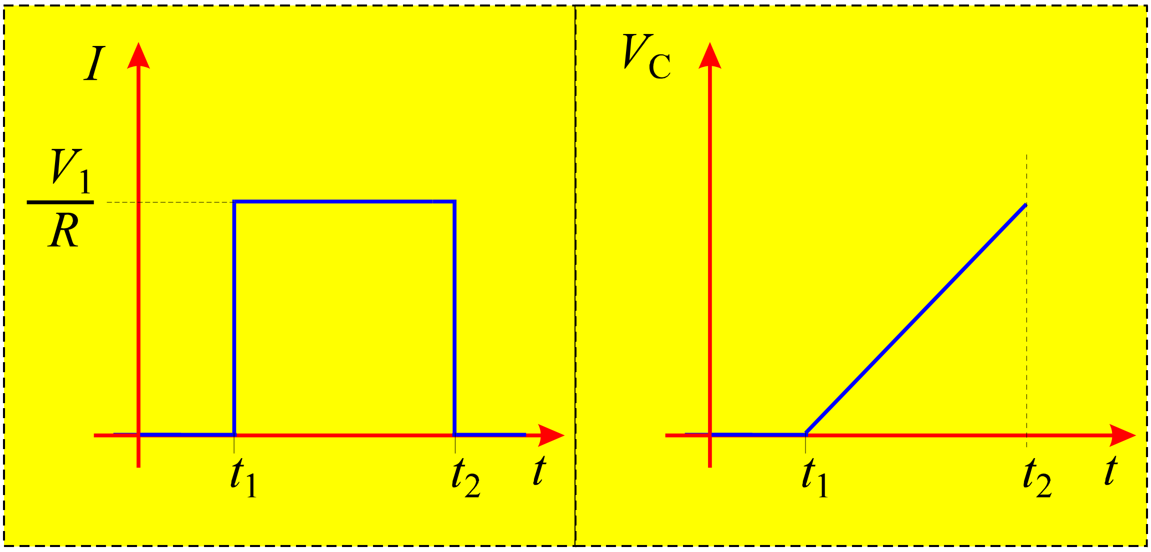


Fig.28 Corrente no resistor e tensão no capacitor para $t_1 < t < t_2$.

Como o terminal *A* do capacitor está mantido a um potencial essencialmente nulo, o aumento de tensão no capacitor só pode ocorrer se a tensão de saída V_0 diminuir linearmente com o tempo, de forma que

$$V_C(t) = V_A - V_o(t) = 0 - V_o(t) = -V_o(t)$$

Assim, uma queda de tensão positiva entre os terminais do capacitor só pode ocorrer se a tensão V_0 tornar-se negativa, conforme mostrado na **Fig.29**, de forma que o segundo membro da expressão anterior seja positivo.

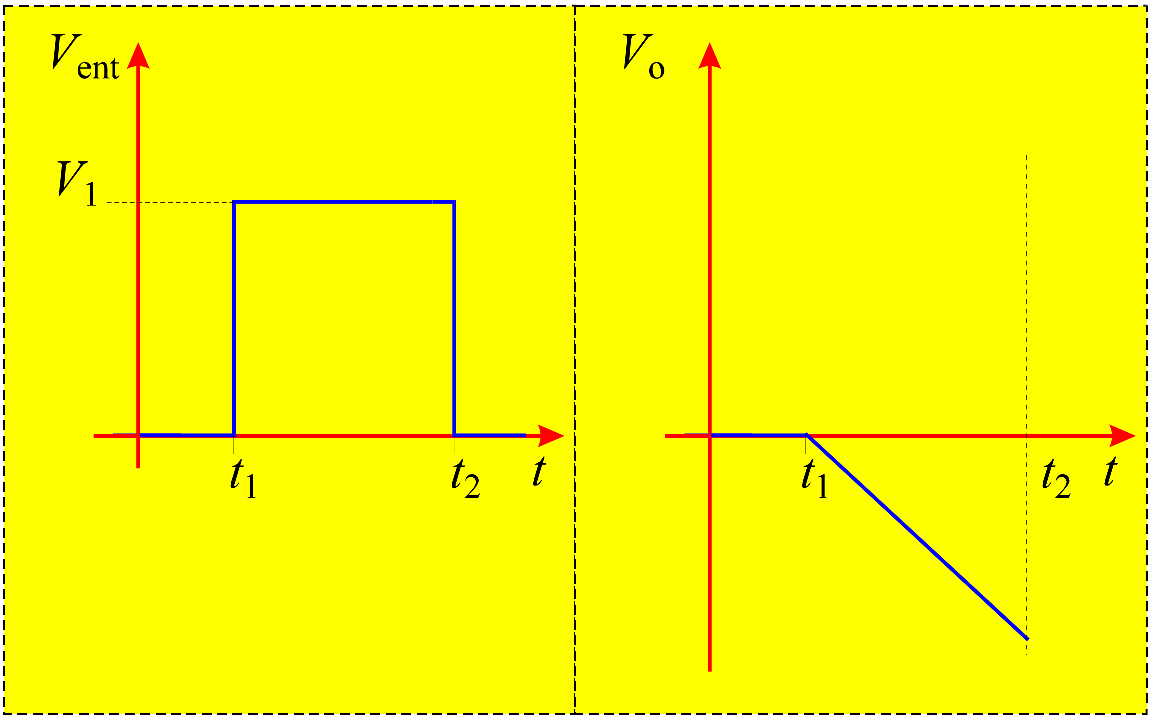


Fig.29 Tensões de entrada e saída no circuito integrador para $t_1 < t < t_2$.

A tensão de saída assume portanto um valor negativo que varia linearmente com o tempo e permanece variando enquanto a tensão de entrada permanecer no valor V_1. Essa variação poderá ser interrompida em três situações:

- Se a tensão de saturação do operacional for atingida.
- Se o capacitor atingir seu limite de carga.
- Se a tensão de entrada mudar de valor.

A saturação do operacional pode ser evitada se a tensão V_1 aplicada for sempre inferior a tensão de saturação do operacional. A segunda depende dos valores de *R*, *C* e largura do pulso de entrada e pode ser evitada pelo emprego de valores adequados para *R* e *C*.

Se a tensão de entrada retorna novamente a zero para $t > t_2$, a queda de tensão no resistor torna-se nula, visto que o terminal *A* do operacional corresponde ao terra virtual, conforme mostrado na **Fig.30**. Esse valor nulo de tensão implica uma corrente nula circulando através do resistor e do capacitor. Nessas condições a carga armazenada no capacitor não se altera e a tensão de saída se mantém constante para $t > t_2$, conforme mostrado na **Fig.30**.

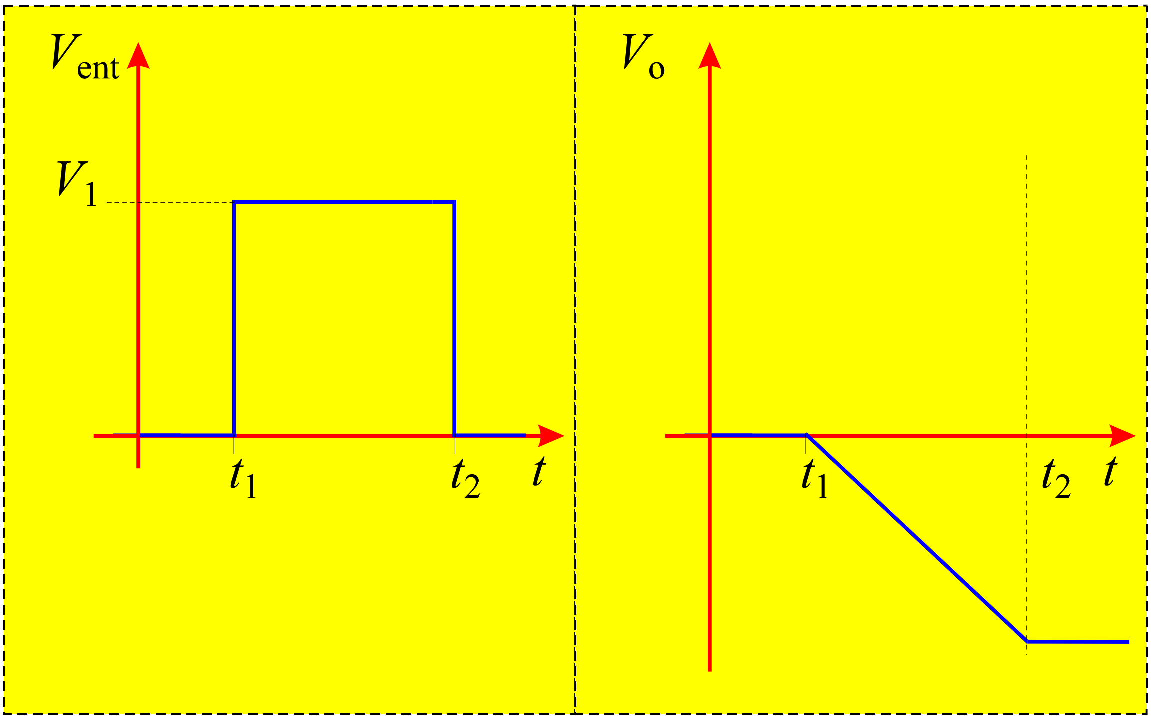


Fig.30 Tensão de entrada e saída para um pulso de entrada que retorna a um valor nulo.

A única possibilidade de descarregar o capacitor é através da aplicação de uma tensão negativa na entrada conforme mostra a **Fig.31**.

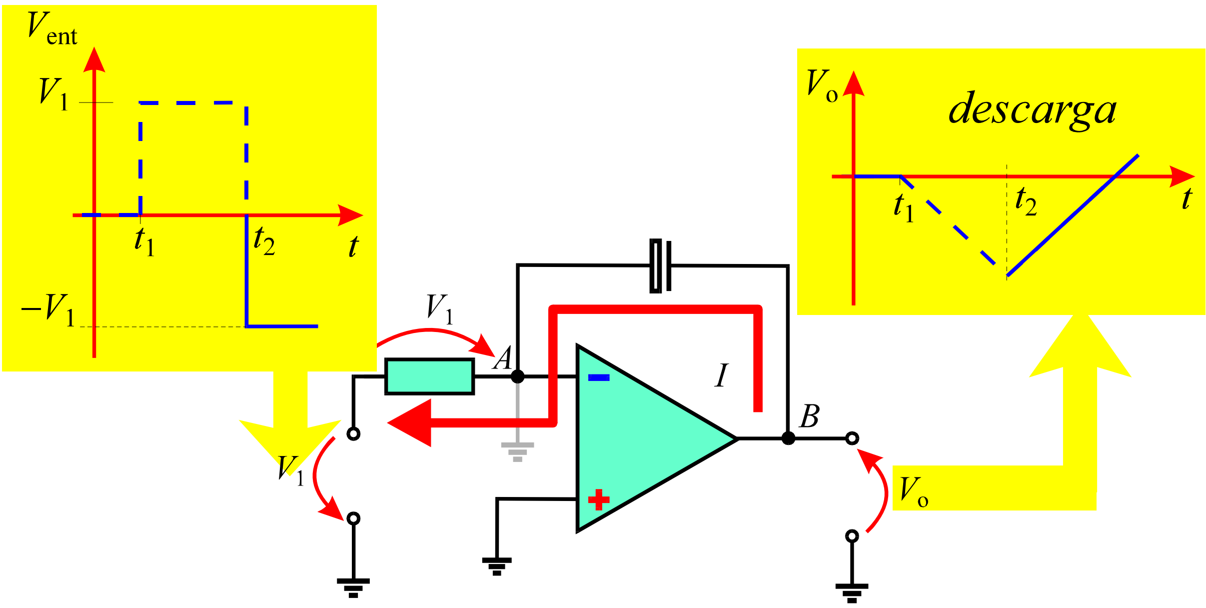


Fig.31 Efeito produzido na saída do integrador por um pulso com uma componente negativa.

A tensão negativa na entrada do resistor fará circular uma corrente constante sobre o resistor, com o sentido indicado na **Fig.31**. Essa corrente constante faz que a carga do capacitor diminua linearmente como função do tempo.

A queda de tensão no capacitor diminui proporcionalmente, e como resultado a tensão de saída aumenta linearmente com o tempo. Se o tempo de aplicação da tensão negativa na entrada for longo o suficiente, a carga armazenada na armadura positiva passa a se tornar negativa e a queda de tensão no capacitor muda de sinal.

Como resultado a tensão de saída passa a ser positiva, como mostrado na **Fig.31**.

Assim, a aplicação de uma onda quadrada simétrica na entrada de um integrador com *AO*, produz na saída uma onda **dente de serra**, do tipo mostrado na **Fig.32**.

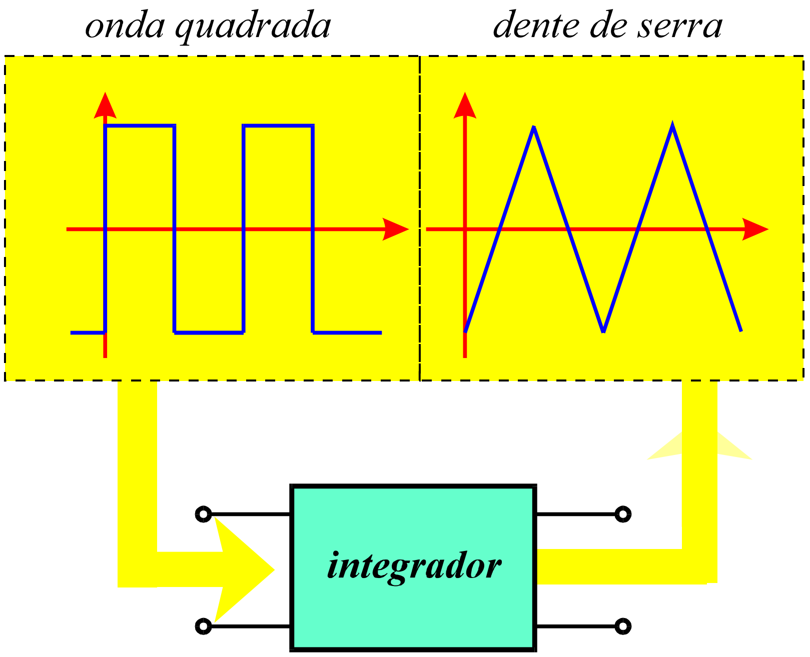


Fig.32 Onda dente de serra gerada a partir de uma onda quadrada simétrica na entrada de um integrador com *AO*.

Na prática, acrescenta-se ao circuito integrador um resistor em paralelo com o capacitor para que o *AO* possa também operar com realimentação *cc*, como indicado na **Fig.33**. Esse resistor, em geral, tem uma resistência 10 vezes maior que aquela do resistor de entrada do circuito. Esse alto valor de resistência minimiza interferências na constante de tempo e formas de onda do circuito, e melhora sua estabilidade.

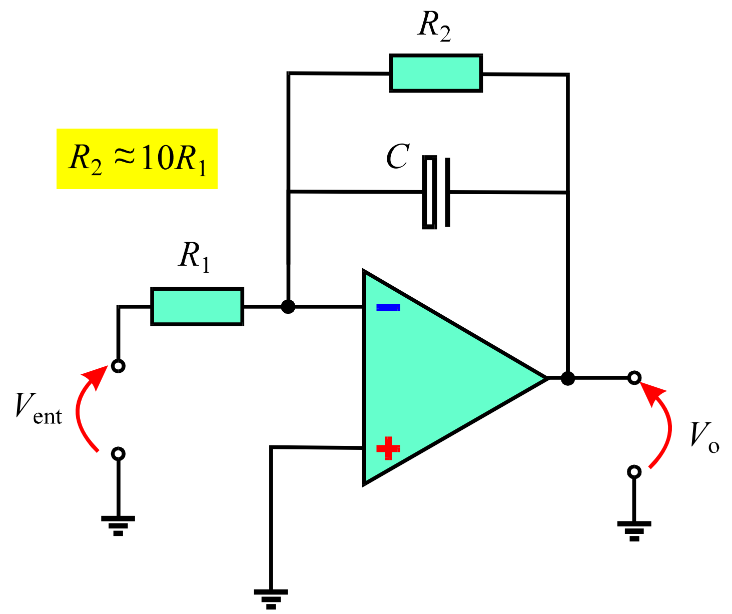


Fig.33 Circuito integrador com a adição de um resistor em paralelo com o capacitor na malha de realimentação.

DIFERENCIADOR COM AMPLIFICADOR OPERACIONAL

O diferenciador com *AO* tem uma configuração que se assemelha à do integrador e pode ser obtido alternando a posição do resistor com a posição do capacitor, conforme ilustrado na **Fig.34.**

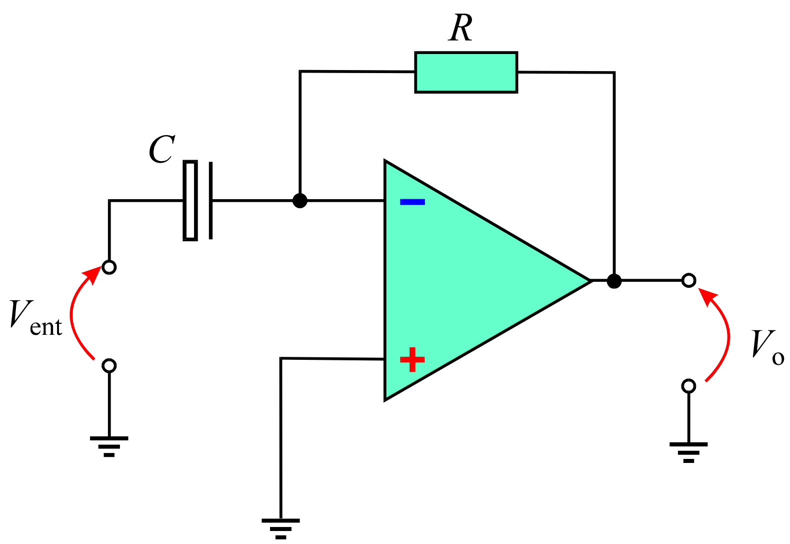


Fig.34 Configuração básica de um diferenciador com *AO*.

Admitindo a aplicação do sinal mostrado na **Fig.35**, quando a tensão de entrada é nula, os dois lados do capacitor estão a um potencial nulo e como não há corrente circulando na malha de realimentação, a tensão de saída é nula.

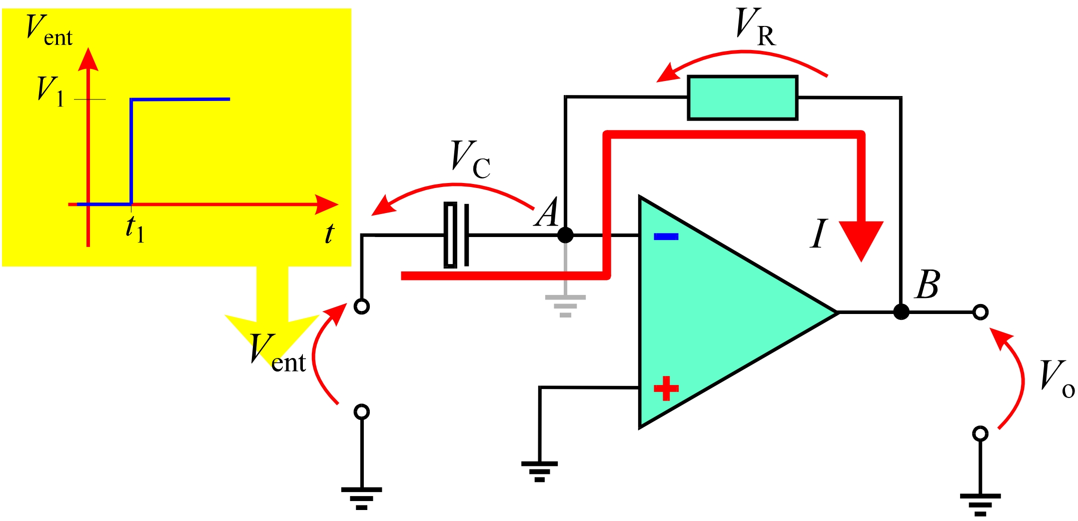


Fig.35 Diferenciador com *AO* sujeito a um sinal de entrada.

Os sinais elétricos no circuito estão mostrados na **Fig.36**. Como pode ser aí observado, no instante de tempo t_1, quando a tensão de entrada varia de zero a um valor V_1, o capacitor tende a se carregar, o que implica uma circulação de corrente através do capacitor e do resistor. Essa corrente circula até que o capacitor se carregue totalmente. Durante esse tempo de carga do capacitor surge uma queda de tensão no resistor. Como o terminal *A* da **Fig.35** está a um potencial nulo, a tensão de saída torna-se negativa durante o tempo de carga do capacitor. O diferenciador exibe uma constante de tempo *RC* pequena, e a corrente de carga circula apenas durante um breve intervalo de tempo, provocando o aparecimento de um pico de tensão negativa na saída do circuito, como mostrado na **Fig.36**.

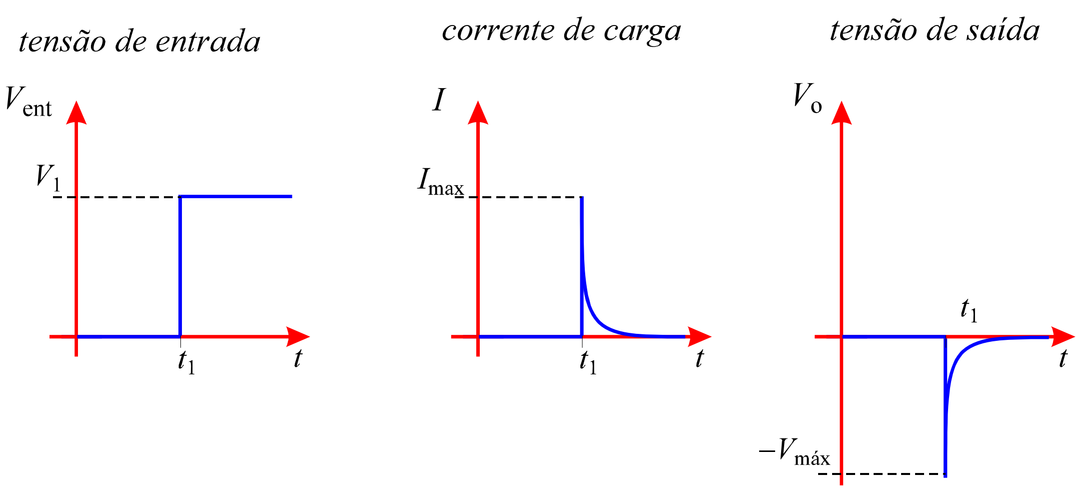


Fig.36 Sinais elétricos no diferenciador com *AO*.

Para uma transição negativa do sinal de entrada, a corrente circula em sentido oposto, gerando um pico positivo na saída, conforme ilustrado na **Fig.37**.

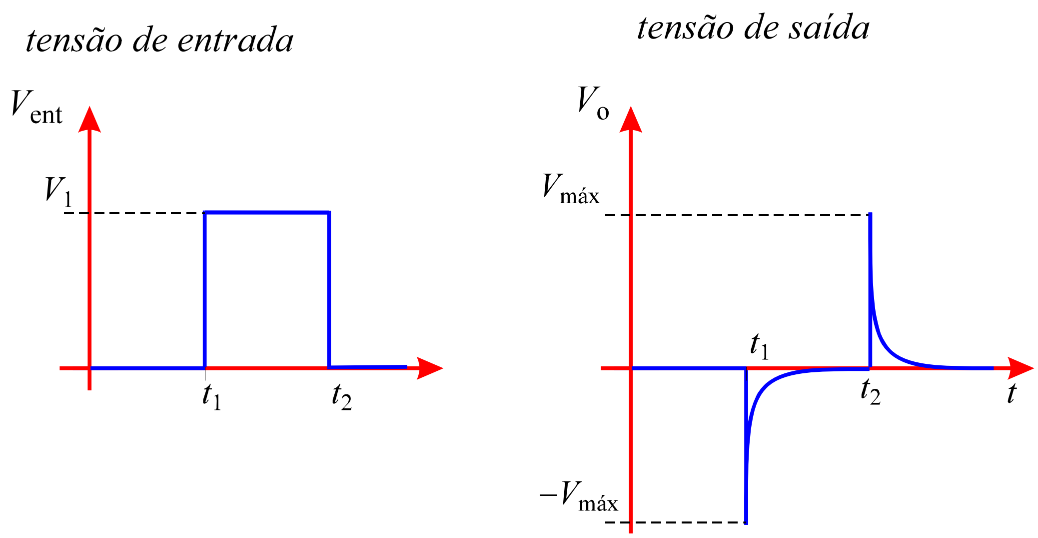


Fig.37 Tensão na saída de um diferenciador submetido a um pulso de tensão.

É muito comum a aplicação de uma tensão dente de serra na entrada do diferenciador. Nesse caso, a variação linear na tensão de entrada, aplicada diretamente aos terminais do capacitor, impede que a corrente de carga varie, gerando tensões de saída constantes e proporcionais às inclinações das rampas associadas à tensão dente de serra, conforme ilustrado na **Fig.38**.

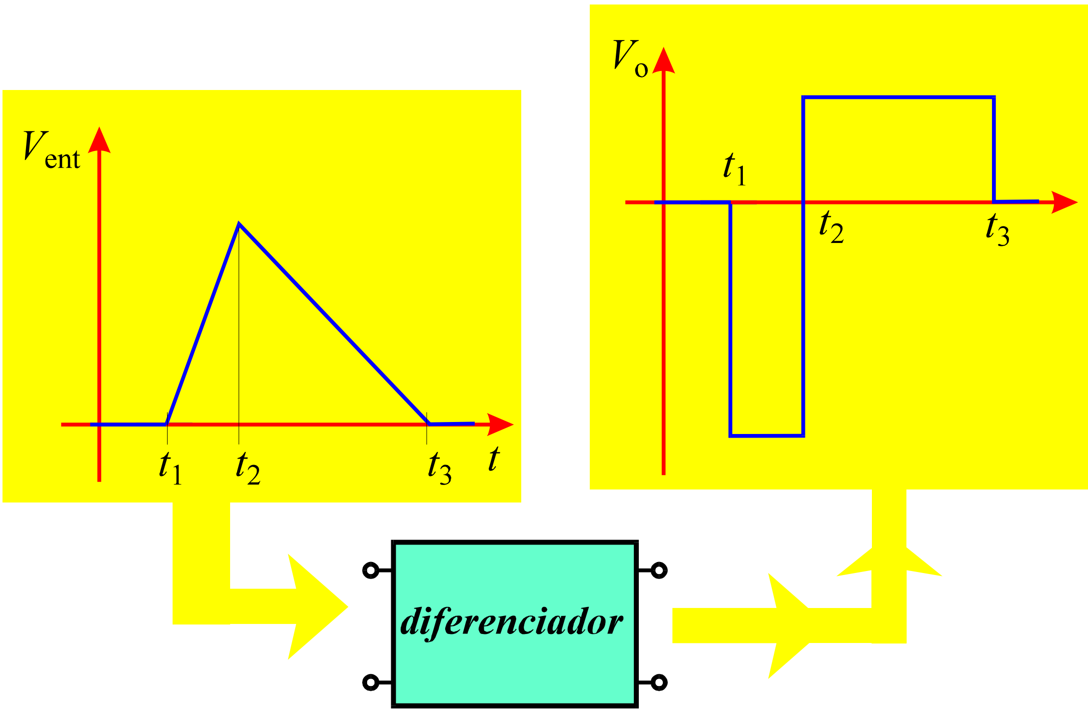


Fig.38 Tensão de saída de um diferenciador submetido a um pulso de tensão.

Na prática acrescenta-se um resistor em série com o capacitor no circuito diferenciador, conforme mostrado no diagrama da **Fig.39**. Esse resistor evita oscilações do circuito em altas freqüências e tem, geralmente, uma resistência 10 vezes menor que aquela do resistor da malha de realimentação.

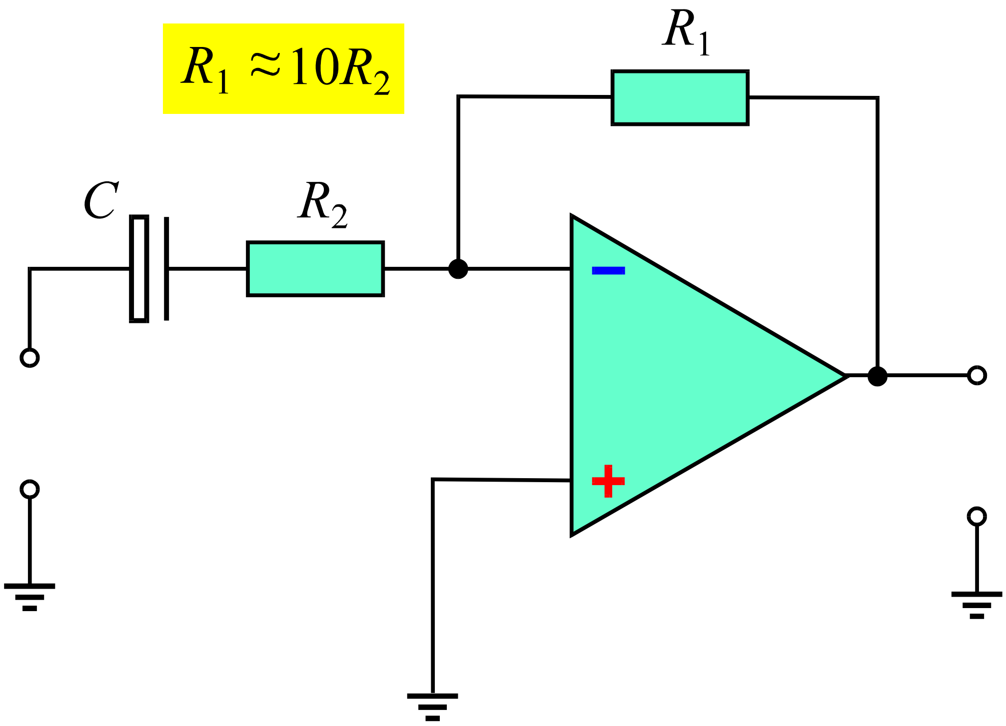


Fig.39 Diferenciador com *AO* com resistor em série com o capacitor.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Faça um desenho de uma seqüência periódica de pulsos retangulares e identifique os seguintes parâmetros: ciclo, período, largura de pulso, freqüência e componente *cc*.

2. O que se entende por integração, no sentido matemático?

3. Qual é a função básica de um circuito integrador?

4. Qual é a função básica de um circuito diferenciador?

5. De que forma um circuito *RC* pode ser configurado para servir como integrador? E como diferenciador?

6. Qual é a máxima largura de pulso que pode ser aplicada a um circuito *RC* integrador para que o circuito opere satisfatoriamente?

7. Qual é o máximo valor da constante de tempo de um circuito diferenciador *RC*, em relação à largura do pulso de entrada, para que ele opere satisfatoriamente?

8. Desenhe os diagramas de circuito de um integrador com *AO* e de um diferenciador com *AO*.

9. Qual é a vantagem de uso de diferenciadores e integradores com *AO* relativamente àqueles circuitos na configuração *RC*?

BIBLIOGRAFIA

LANDO, Roberto Antônio & ALVES, Sérgio Rios, Amplificador operacional, São Paulo, Érica (1983).

MALVINO, Albert Paul, Eletrônica vol.2, São Paulo, Mc-Graw Hill do Brasil, (1986).

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Introdução

A eletrônica evolui rapidamente e vivencia-se atualmente a era dos equipamentos digitais e microcomputadores, já acessíveis em larga escala para usuários em geral.

Aparelhos digitais são baseados em **circuitos eletrônicos digitais** que empregam milhares de transistores operando nos regimes de saturação e corte. Um dos circuitos utilizados com freqüência naquela classe de dispositivos é o multivibrador biestável.

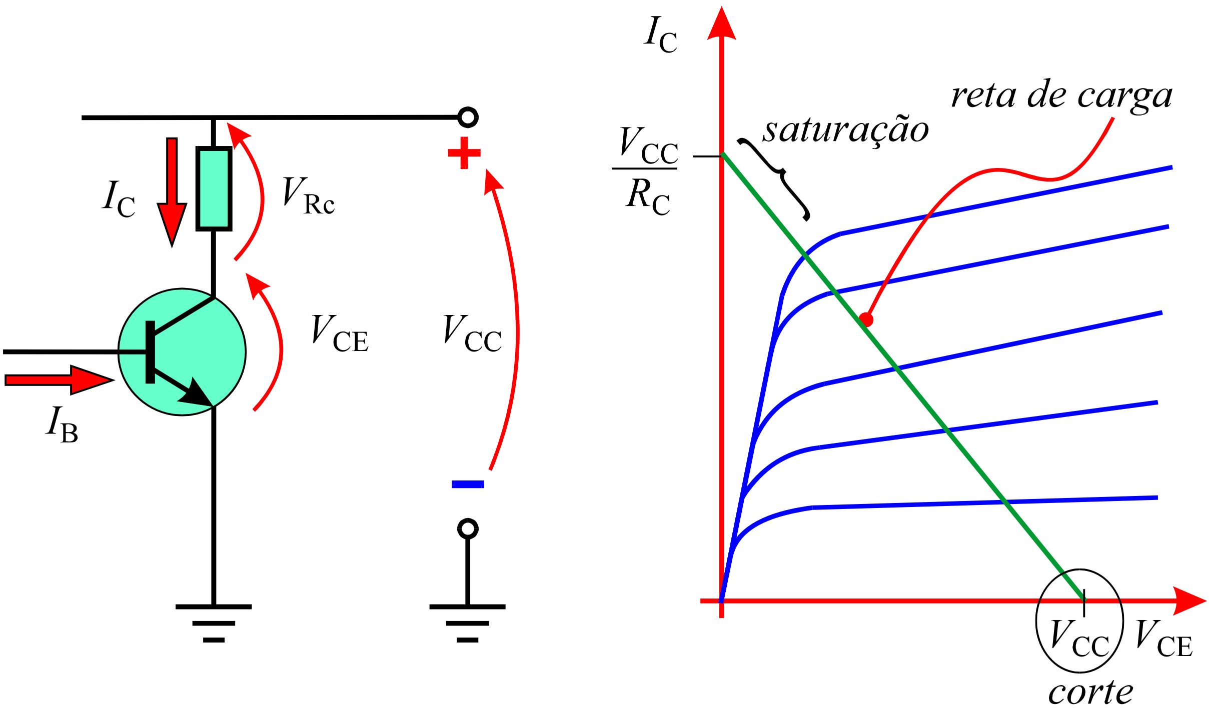
Este fascículo é inicialmente dirigido a uma revisão dos conceitos de saturação e de corte em um transistor. Em seguida será tratado o princípio de funcionamento dos multivibradores biestáveis de forma a introduzir ao leitor os fundamentos da eletrônica digital.

Para a boa compreensão do conteúdo e desenvolvimento das atividades contidas neste fascículo, o leitor deverá estar familiarizado com os conceitos relativos a:

- Transistor bipolar: ponto de operação
- Circuito integrador e diferenciador.

Saturação e corte

Em um circuito transistorizado controlado pela corrente de base, a saturação e o corte correspondem às regiões de operação do transistor situadas, respectivamente, na parte superior e inferior da reta de carga, conforme mostrado na **Fig.1**.



(a) (b)

Fig.1 **(a)** Circuito transistorizado controlado por corrente de base. **(b)** Gráficos da reta de carga e das curvas características de saída.

A condição de corte corresponde mais exatamente à situação em que a corrente de base é nula. Essa condição implica a existência de uma corrente de fuga no coletor I_{CEO} da ordem de alguns microampères na temperatura de trabalho. Com $I_B = 0$ e $I_C = I_{CEO}$, a queda de tensão no resistor da **Fig.1** é praticamente nula, de forma que a tensão $V_{CE} \approx V_{CC}$.

Quando o transistor opera na condição de corte, o seu comportamento é similar ao de um interruptor que está **desligado**, **cortando** a corrente no circuito.

Um modelo de circuito para essa condição está mostrado na **Fig.2**.

Um transistor operando na condição de corte se comporta como um interruptor aberto.

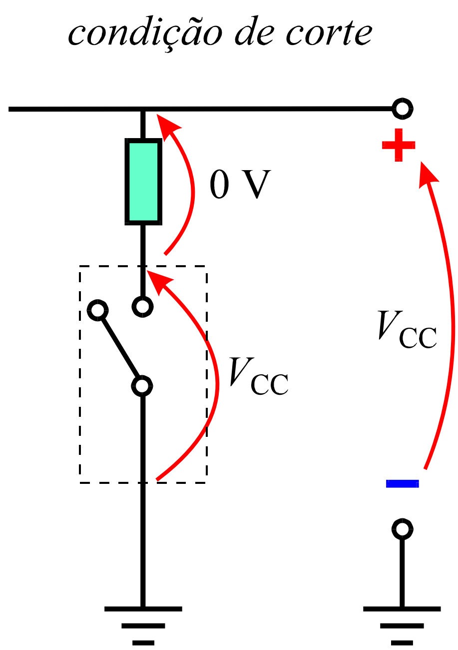


Fig.2 Modelo do circuito transistorizado na condição de corte.

A condição de saturação, por outro lado, corresponde à situação em que $V_{CE} < V_{BE}$. Para transistores de silício a saturação é alcançada através do aumento da corrente de base de forma que a queda de tensão no resistor de coletor atinja praticamente o valor da tensão de alimentação. Nessas condições a tensão V_{CE} atinge valores inferiores a 0,6 V. A saturação completa dos transistores de silício ocorre quando $V_{BE} \approx 0{,}7$ V.

A **Fig.3** mostra um exemplo de circuito com transistor de silício operando na condição de saturação completa.

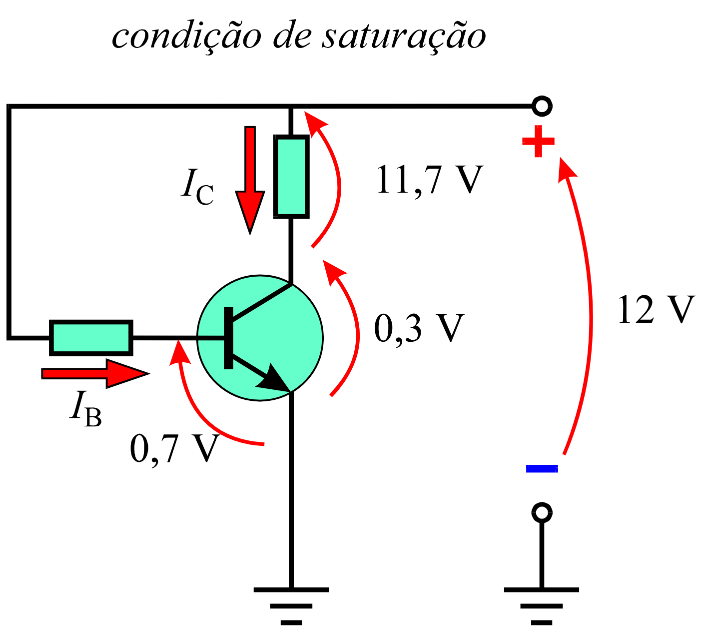


Fig.3 Exemplo de circuito operando na condição de saturação completa.

A nível de circuito um transistor completamente saturado se comporta de forma semelhante a um interruptor fechado. Nessas condições, a corrente de saturação vale aproximadamente

$$I_{C,sat} \approx \frac{V_{CC}}{R_C}$$

A **Fig.4** ilustra através de um exemplo a pequena diferença de comportamentos de um circuito com transistor completamente saturado, relativamente ao circuito resultante da substituição do transistor por uma chave fechada. As correntes aí indicadas são praticamente idênticas. Isso mostra que a chave fechada é uma boa representação para o transistor completamente saturado.

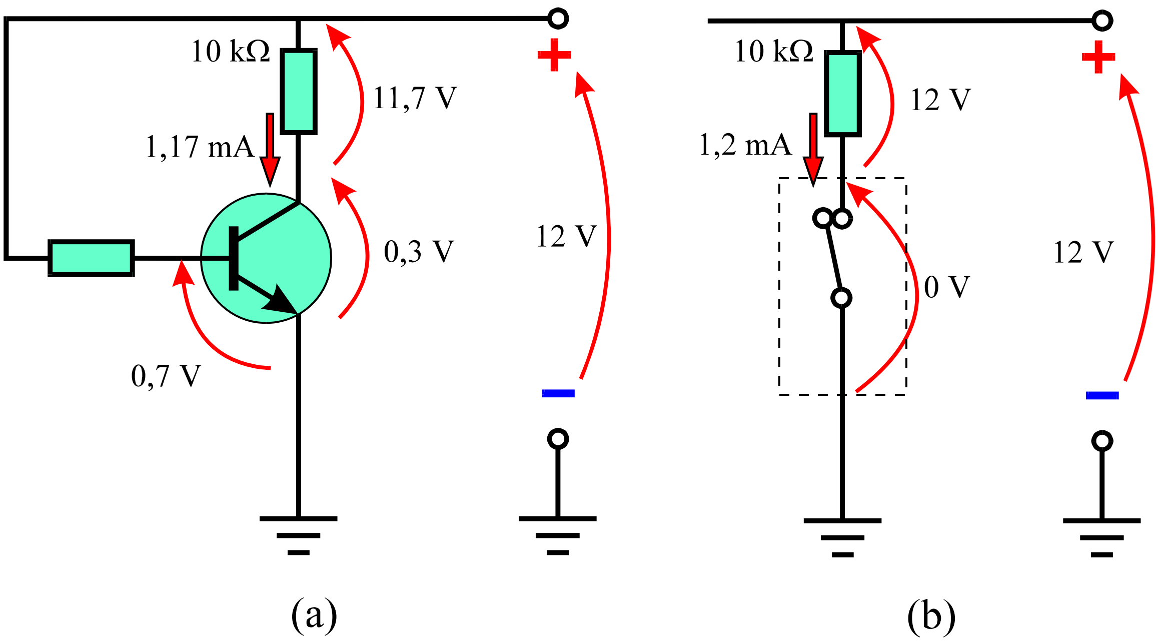


Fig.4 (a) Circuito com transistor completamente saturado. **(b)** Circuito equivalente correspondente.

Um transistor operando na condição de saturação completa se comporta como um interruptor fechado.

Existem circuitos, denominados de **circuitos digitais**, que só utilizam transistores operando nas condições de corte ou saturação. Esses circuitos são também denominados de **circuitos de chaveamento**, devido à equivalência daqueles regimes de operação com o comportamento de chaves.

Circuitos digitais de chaveamento empregam transistores ou outros componentes que estejam nos estados de corte ou saturação.

Assim, os circuitos eletrônicos podem ser divididos em dois grandes grupos:

Circuitos analógicos

São aqueles em que os componentes ativos podem estar em qualquer regime de operação. São exemplos de circuitos analógicos: amplificadores, fontes reguladas etc.

Circuitos digitais

São aqueles em que os componentes ativos trabalham apenas nos regimes de corte ou saturação.

Em um circuito digital um transistor deve ser conectado a uma porção do circuito de forma a operar apenas em dois estados. O comando do estado do transistor depende fundamentalmente da corrente de base.

Exemplo 1: Verificar que o circuito transistorizado mostrado na **Fig.5** opera **apenas** nos regimes de corte ou saturação, a partir do cálculo dos parâmetros elétricos do circuito com a chave nas posições *A* e *B*.

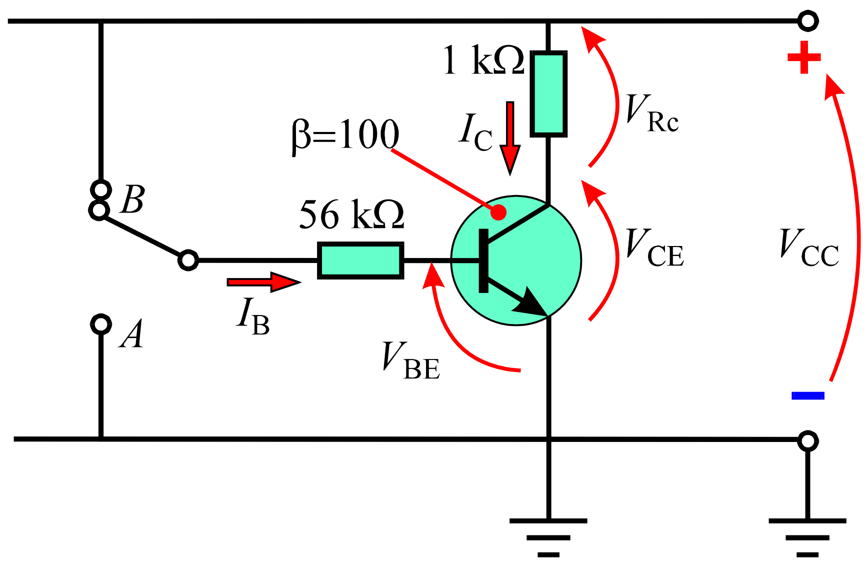


Fig.5 Exemplo de circuito transistorizado que opera apenas no regime de corte ou saturação.

Com a chave da **Fig.5** na posição *A* tem-se que

$$V_{BE} = 0 \Rightarrow I_B = 0 \Rightarrow I_C = I_{CE0} \approx 0$$

o que implica a condição de corte, uma vez que

$$V_{Rc} \approx 0 \Rightarrow V_{CE} \approx V_{CC}$$

Se a chave passar para a posição *B*, tem-se que

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$$

Admitindo que $V_{BE} \approx 0{,}6$ V e utilizando $V_{CC} = 12$ V, $R_B = 56$ kΩ obtém-se

$$I_B = \frac{12 - 0{,}6}{56}\ \text{mA} = \frac{11{,}4}{56}\ \text{mA} = 0{,}203\ \text{mA} = 203\ \mu\text{A}$$

Uma estimativa inicial para a corrente de coletor pode ser obtida com o uso da relação $I_C=\beta I_B$, que fornece

$$I_C = 100 \times 203\ \mu\text{A} = 20{,}3\ \text{mA}$$

No entanto o valor máximo da corrente de coletor ocorre quando toda tensão de alimentação é aplicada sobre o resistor de coletor. Essa corrente máxima vale

$$I_{C,máx} = \frac{V_{CC}}{R_C} = \frac{12\ \text{V}}{1.000\ \Omega} = 12\ \text{mA}$$

Com esse limite imposto pelo resistor de coletor, o regime de operação real do transistor da **Fig.5** deve corresponder aos seguintes valores dos parâmetros elétricos do circuito:

$$\boxed{I_B = 203\mu A\ ,\ I_C = I_{C,máx} = 12\ \text{mA}\ ,\ V_{CE} \approx 0 \Longrightarrow \text{saturação}}$$

Exemplo 2: Verificar que, se a resistência R_B for aumentada para 150kΩ no circuito transistorizado mostrado na **Fig.5**, o transistor passará a operar na região ativa, quando a chave estiver conectada na posição *B*.

Com a chave na posição *B*, tem-se que

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} = \frac{12 - 0,6}{150}\ \text{mA} = \frac{11,4}{150}\ \text{mA} = 0,076\ \text{mA} = 76\ \mu\text{A}$$

e a corrente de coletor vale

$$I_C = 100 \times 76\ \mu\text{A} = 7,6\ \text{mA}$$

Esse valor da corrente de coletor é inferior ao valor máximo de 12 mA, o que mostra claramente que o transistor está operando na região ativa. Nessas condições a queda de tensão no resistor de coletor vale

$$V_{Rc} = 7,6\ \text{mA} \times 1\ \text{k}\Omega = 7,6\ \text{V}$$

e a tensão coletor-emissor,

$$V_{CE} = 12 - 7,6 = 4,4\ \text{V}$$

Os resultados obtidos nos **Exemplos 1** e **2** servem para demonstrar a importância da escolha do valor de R_B para que a saturação seja atingida. Portanto, um circuito transistorizado pode funcionar como chaveador desde que seja corretamente polarizado para tal.

O multivibrador biestável

O multivibrador biestável é um circuito eletrônico em que as saídas podem assumir apenas dois estados distintos. O circuito do multivibrador biestável, ou **flip-flop** como também é conhecido, é composto basicamente de **dois transistores polarizados nos dois estados possíveis de chaveamento**.

Esse circuito é configurado de tal forma que quando um dos transistores está saturado o outro está em corte e vice-versa. A análise do multivibrador biestável é feita a seguir.

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

A **Fig.6** mostra um tipo comum de circuito do multivibrador biestável que utiliza apenas um valor de tensão de alimentação. Existe também um outro circuito para o multivibrador biestável que utiliza duas tensões de alimentação, uma positiva, outra negativa. No entanto a configuração mostrada na **Fig.6** é a mais utilizada atualmente.

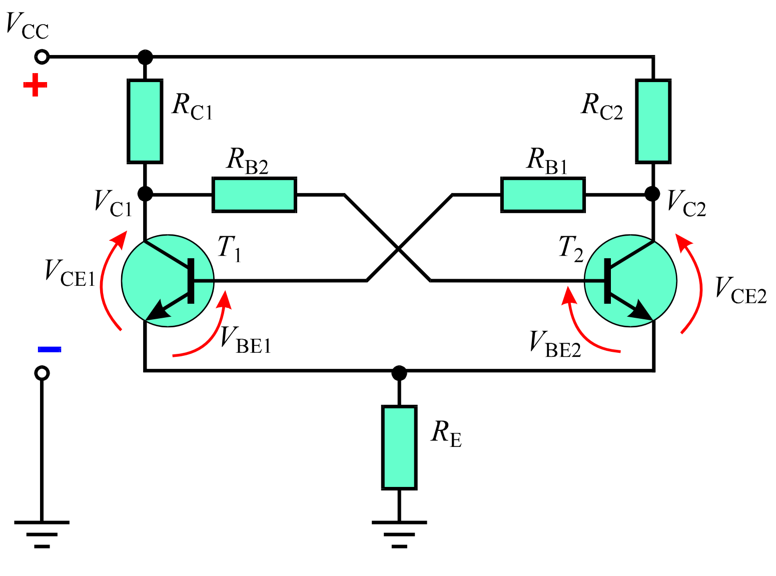


Fig.6 Configuração básica de um multivibrador biestável.

Antes de analisar o princípio de funcionamento do multivibrador é conveniente observar alguns aspectos importantes:

- Ambos os transistores estão polarizados por corrente de base através de dois resistores:

$R_{C2} + R_{B1} \Longrightarrow$ resistência de base para T_1
$R_{C1} + R_{B2} \Longrightarrow$ resistência de base para T_2

- O potencial no terminal do coletor de um dos transistores é utilizado para alimentar o resistor de base do outro transistor, ou seja:

$V_{C1} - V_{BE2} \Longrightarrow$ tensão sobre R_{B2}
$V_{C2} - V_{BE1} \Longrightarrow$ tensão sobre R_{B1}

Essa última condição está ilustrada na **Fig.7**.

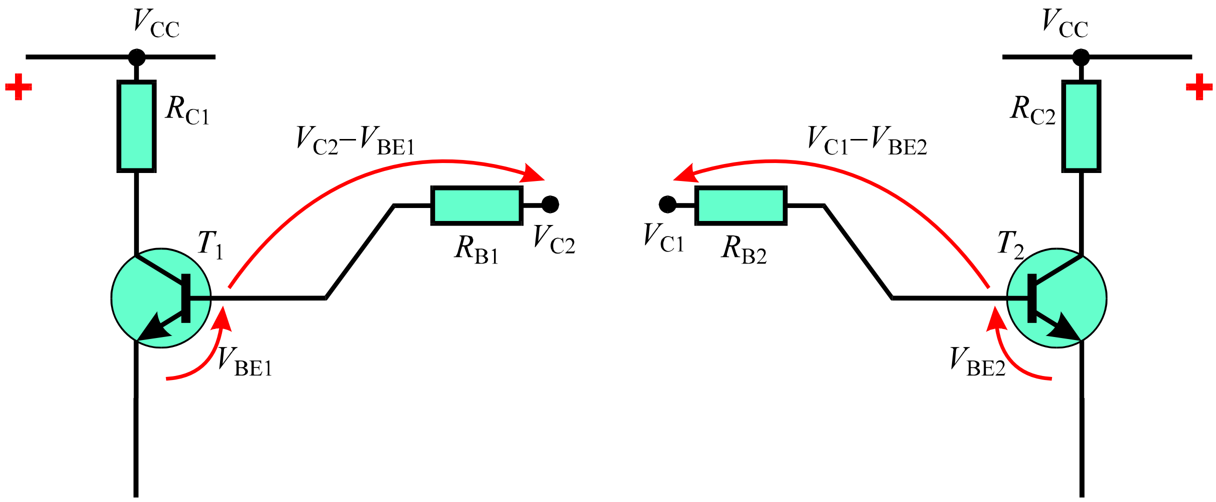


Fig.7 Tensões aplicadas nos resistores de base do multivibrador biestável.

O tipo de interconexão dos transistores do multivibrador mostrado na **Fig.6** tem uma particularidade: **a saturação de um dos transistores força a condição de corte no outro**.

Por exemplo, se T_1 estiver saturado, irá comportar-se praticamente como uma chave fechada de forma que V_{CE1} =0,3 V ≈ 0 V, conforme mostrado na **Fig8**. Esse pequeno valor de tensão é insuficiente para alimentar o terminal de base de T_2 , o que leva o transistor T_2 à condição de corte.

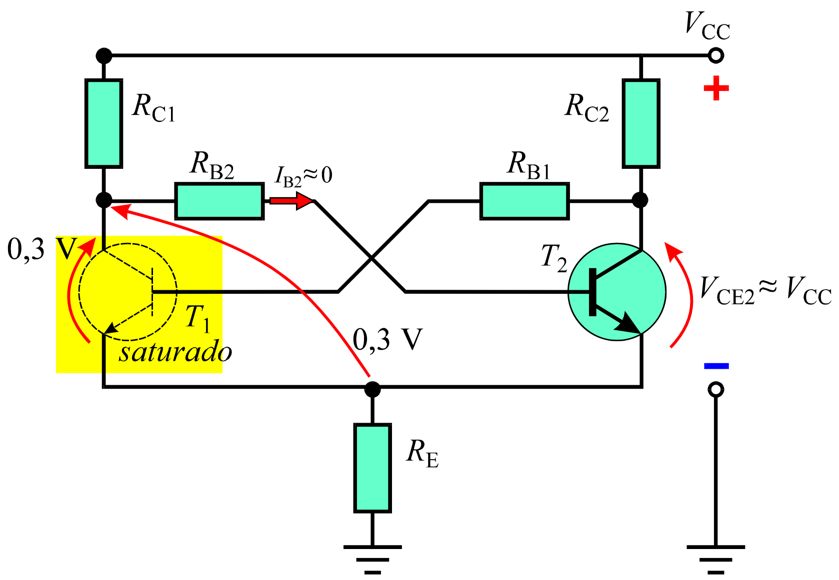


Fig.8 Circuito equivalente do multivibrador biestável com T_1 saturado.

Nessa condição o transistor T_2 se comporta como uma chave aberta, de forma que $V_{CE2} \approx V_{CC}$. Como se pode observar na **Fig.9**, esse alto valor de tensão é aplicado quase que totalmente sobre o resistor R_{B1} e a corrente resultante

$$I_{B1} = \frac{V_{CC}}{R_{B1}}$$

é suficiente para manter o transistor T_1 saturado.

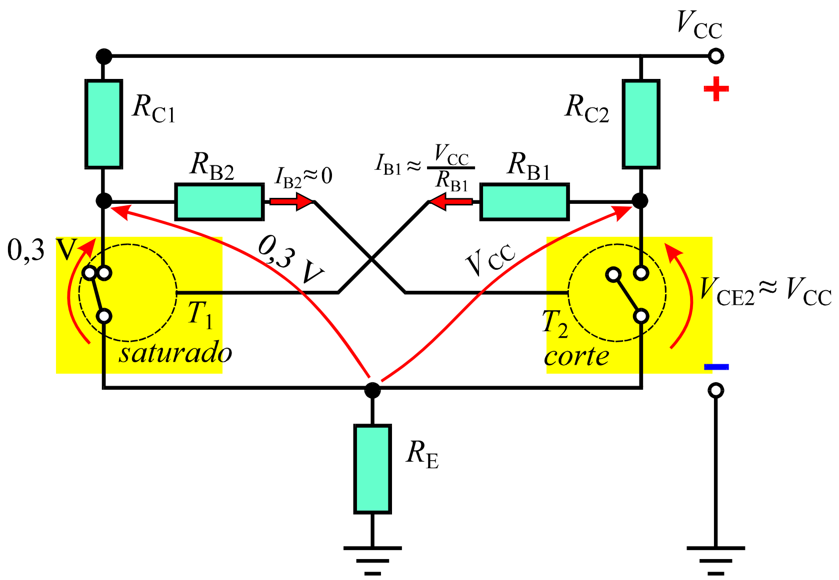


Fig.9 Circuito equivalente do multivibrador biestável com T_1 saturado e T_2 no corte.

A condição de corte em T_1, com T_2 saturado, pode ser analisada de forma semelhante. Assim, na ausência de interferência externa, o multivibrador permanecerá estável com um transistor saturado e outro transistor na condição de corte.

Em resumo, na ausência de interferência externa o multivibrador biestável permanece em um dos seguintes estados:

T_1 saturado $\Leftrightarrow$ T_2 cortado

T_1 cortado $\Leftrightarrow$ T_2 saturado

É importante também observar que os dois transistores têm os emissores ligados ao mesmo resistor R_E, conforme mostrado na **Fig.10**. Essa configuração mantém aproximadamente fixo o potencial V_E da **Fig.10**.

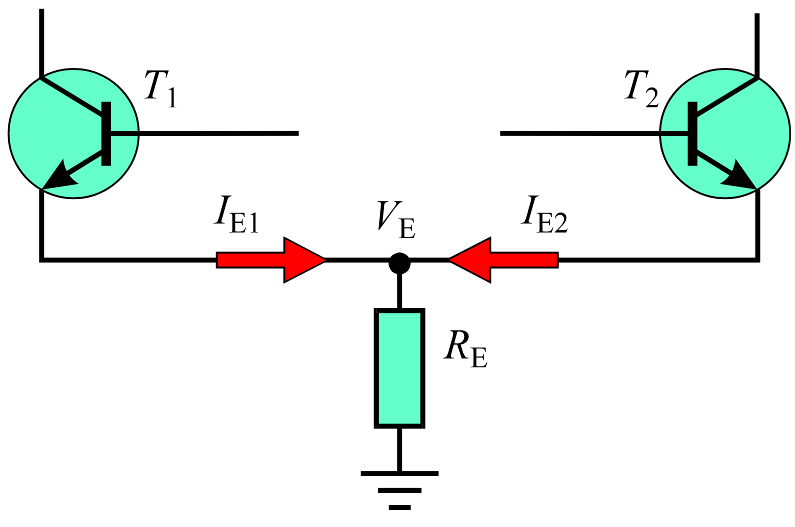


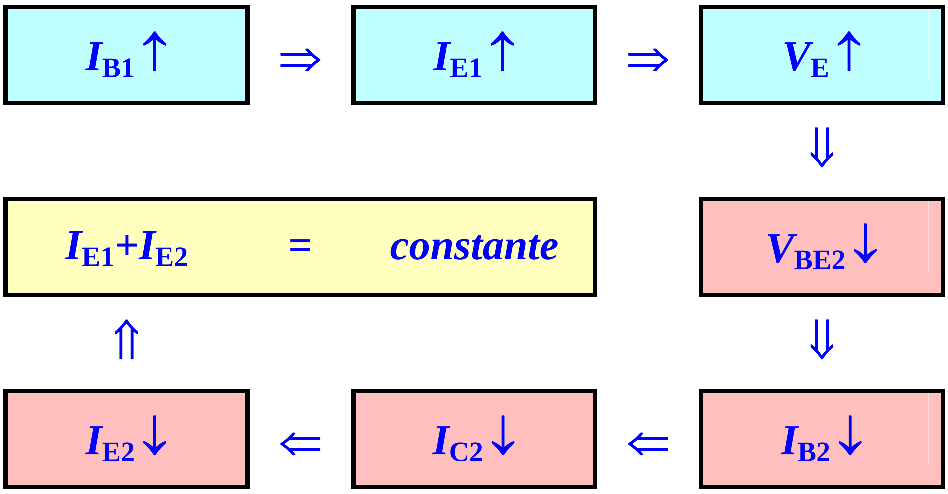
Fig.10 Porção do circuito do multivibrador biestável.

Essa afirmativa pode ser verificada notando inicialmente que a queda de tensão no resistor de emissor depende das correntes de emissor dos dois transistores, sendo dada por

$$V_E = R_E(I_{E1} + I_{E2})$$

Essa última expressão indica, por exemplo, que um aumento na corrente I_{E1}, causado por um acréscimo na corrente I_{B1} resulta em um aumento no potencial V_E. Isso implica uma diminuição da tensão V_{BE2} que por sua vez causa um decréscimo na corrente I_{B2}. Como resultado a corrente I_{C2} e

conseqüentemente a corrente I_{E2} diminuem. Essa seqüência de eventos pode ser representada pelo diagrama:



Como se pode observar no diagrama, os efeitos produzidos sobre as correntes I_{E1} e I_{E2} tendem a cancelar-se, o que permite manter o potencial V_E em um valor aproximadamente constante.

Uma questão de importância na análise do multivibrador biestável é a determinação de qual dos dois estados possíveis irá estabelecer-se no circuito imediatamente após a ligação da fonte de alimentação. Essa situação está ilustrada na **Fig.11** que indica a existência das correntes I_{B1} e I_{B2} imediatamente após a ligação da fonte de alimentação.

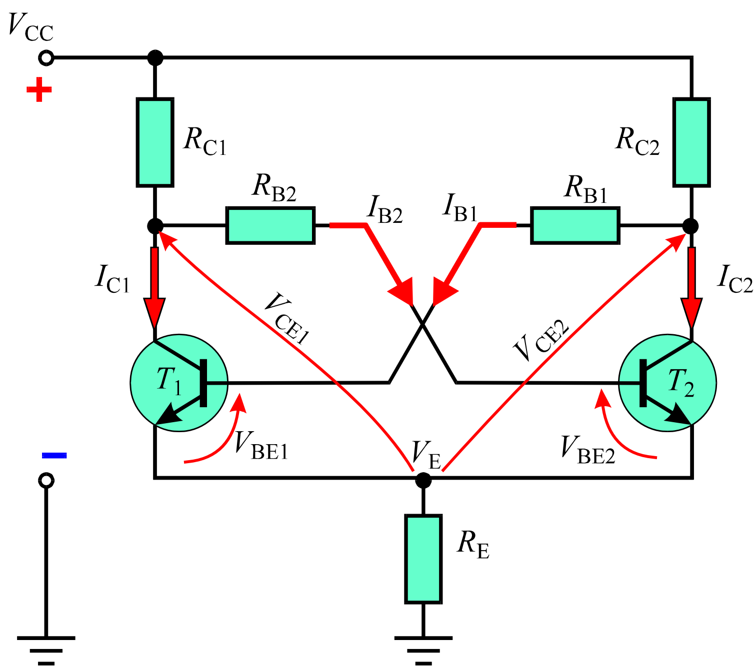


Fig.11 Multivibrador biestável alimentado externamente.

Admitindo que os resistores do circuito obedeçam às condições de simetria

$$R_{B1} = R_{B2} \quad \text{e} \quad R_{C1} = R_{C2}$$

resulta em correntes de base iguais, isto é,

$$I_{B1} = I_{B2}$$

Considerando que é praticamente impossível que dois transistores tenham exatamente o mesmo ganho, admite-se que o ganho de T_2 seja um pouco maior que o ganho de T_1, ou seja,

$$\beta_2 > \beta_1$$

e essa condição fornece

$$\beta_2 I_{B2} > \beta_1 I_{B1} \quad \Rightarrow \quad I_{C2} > I_{C1}$$

Essa condição inicial implica a seqüência de eventos, ilustrados na **Fig.12**, e sumarizados logo a seguir:

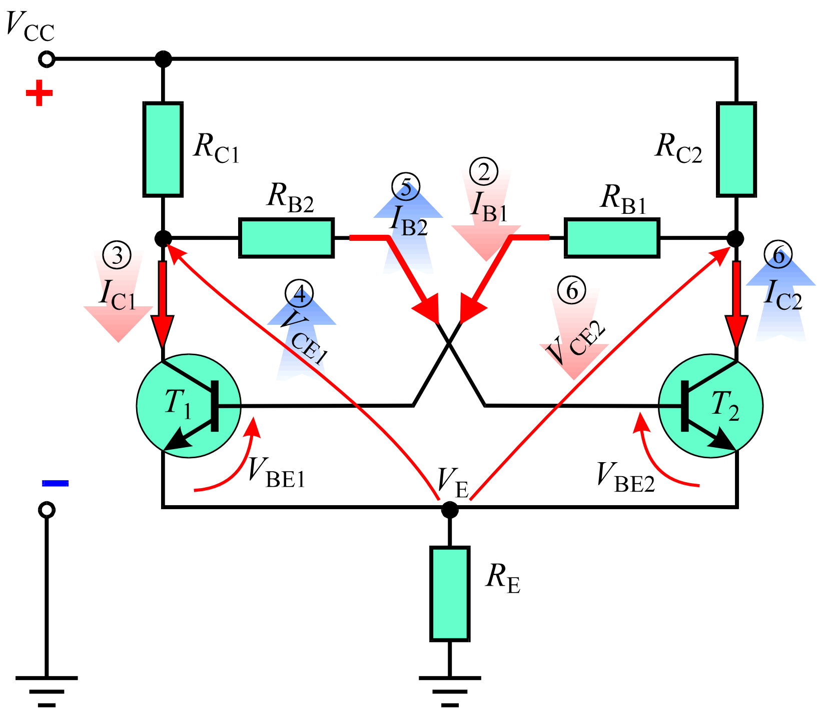
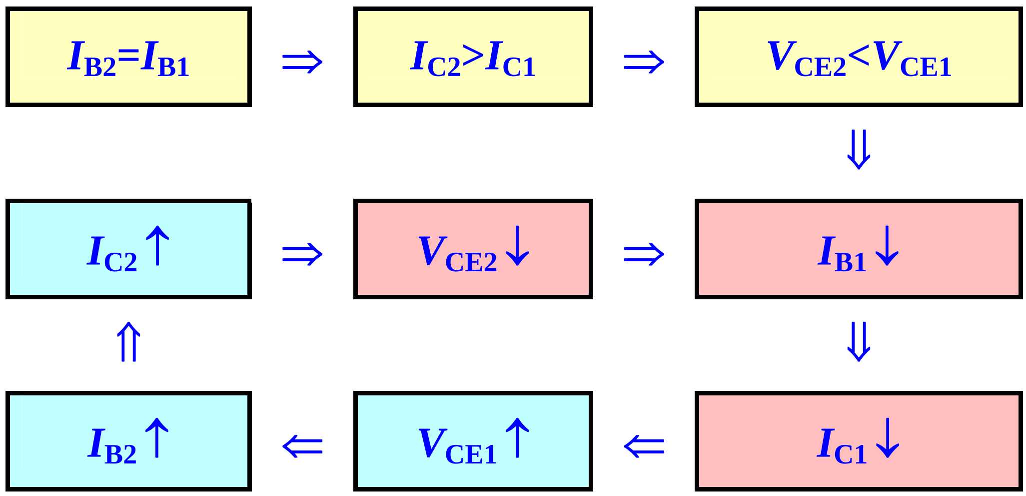


Fig.12 Seqüência de eventos desencadeados ao se ligar um multivibrador biestável exibindo $\beta_2 > \beta_1$.

Eventos mostrados na Fig.12:

1) $I_{C2} > I_{C1} \;\Rightarrow\; V_{CE2} < V_{CE1}$.
2) Como V_{CE2} está aplicado sobre R_{B1}, a corrente I_{B1} diminui em relação ao seu valor inicial, tornando-se inferior a I_{B2}.
3) A diminuição de I_{B1} produz uma diminuição na corrente $I_{C1}=\beta_1 I_{B1}$.
4) Como resultado a tensão V_{CE1} aumenta.
5) Como V_{CE1} está aplicado sobre R_{B2}, a corrente I_{B2} aumenta em relação ao seu valor inicial, tornando-se ainda maior do que I_{B1}.
6) Esse último efeito produz um acréscimo ainda maior na corrente de coletor I_{C2} e o ciclo se repete a partir do evento discriminado no item (**1**).

A seqüência de eventos **(1)** a **(6)** pode ser representada de acordo com o seguinte diagrama:

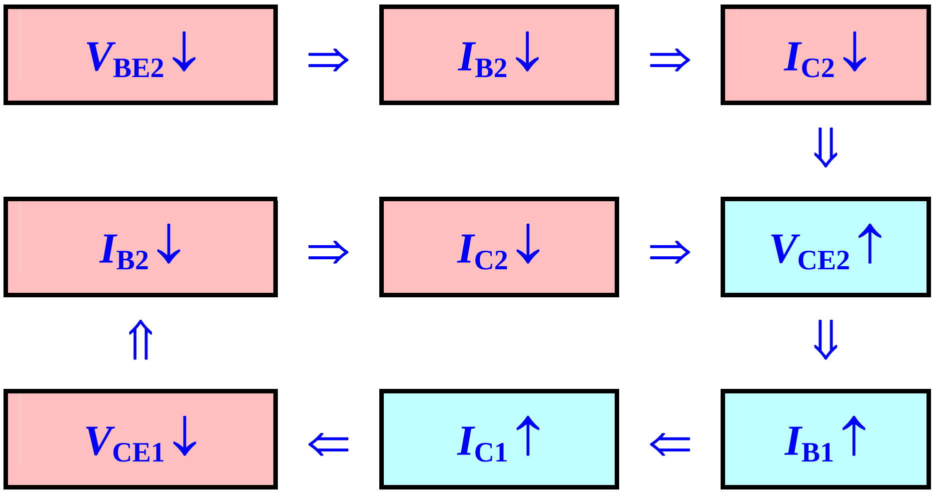


A seqüência cíclica representada no diagrama prossegue até o momento em que I_{C2} atinge o valor de saturação e I_{C1} diminui para um valor praticamente nulo. Quando essa condição é atingida, o transistor T_2 satura e o transistor T_1 entra no regime de corte, e essa situação permanece estável, na ausência de um estímulo externo.

A partir da análise descrita anteriormente, pode-se extrair a seguinte conclusão:

Ao ser alimentado, um multivibrador biestável assume um estado estável. Esse estado corresponde à saturação do transistor de maior ganho ou, alternativamente, ao corte do transistor de menor ganho.

Uma forma de alterar o estado do multivibrador biestável seria curto-circuitar momentaneamente a base e o emissor do transistor saturado. Assumindo T_2 inicialmente saturado, essa condição produziria a seqüência de eventos representada no diagrama a seguir:



O ciclo representado no diagrama prossegue até que T_1 sature e T_2 entre no regime de corte, e o circuito permanece estável nesse novo estado.

Conforme ficou demonstrado na análise, o circuito multivibrador é denominado de biestável por apresentar **dois estados estáveis** . Uma vez que o circuito assuma um determinado estado, nele irá permanecer na ausência de um estímulo externo.

MÉTODOS DE DISPARO DO BIESTÁVEL

O multivibrador biestável não teria aplicação prática se não houvesse uma forma de alterar o seu estado através de impulsos elétricos. Existem algumas maneiras através das quais se podem trocar os estados do circuito, ou seja, fazer com que se invertam as situações de corte e saturação dos transistores. Essa troca de estados é denominada de **transição** ou **disparo**.

Transição ou disparo é a denominação empregada para a troca de estados em um dispositivo eletrônico.

Existem vários métodos que podem ser empregados para provocar uma transição em um multivibrador biestável. Dois desses métodos serão analisados:

- Disparo pelo emissor.
- Disparo pela base.

DISPARO PELO EMISSOR

A transição do multivibrador biestável pode ser provocada através dos emissores dos transistores, acrescentando-se um capacitor ao circuito original, conforme mostrado na **Fig.13.** Através do capacitor são aplicados os pulsos que provocarão as transições.

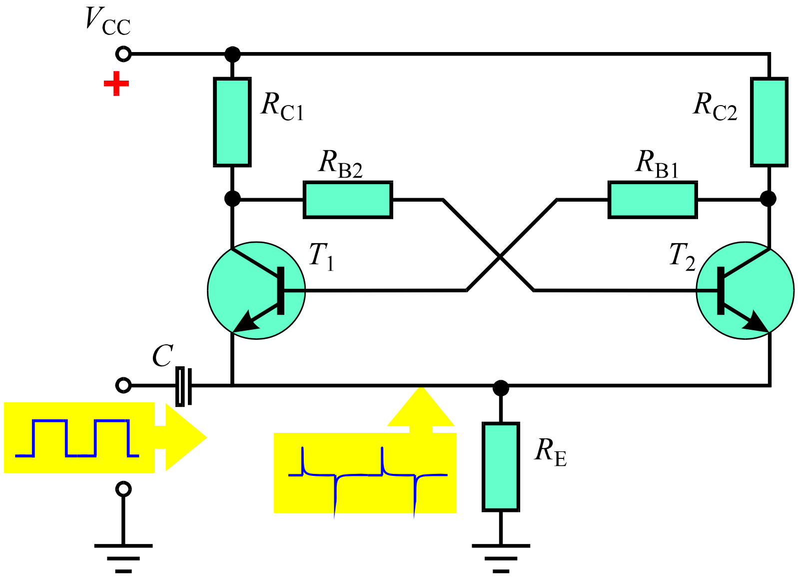


Fig.13 Configuração do multivibrador biestável para disparo pelo emissor.

Como se pode observar na **Fig.13**, o circuito formado pelos componentes *C* e R_E é um diferenciador que dará origem a picos de tensão nos emissores dos transistores, quando for aplicado um trem de pulsos na entrada.

Para compreender como os picos de tensão provocam a transição no biestável, admite-se que o estado do multivibrador esteja inicialmente com T_1 saturado e T_2 no regime de corte.

Como mostrado na **Fig.14**, quando se aplica uma transição **positiva** ao capacitor, a corrente de carga circula através do resistor R_E. Com o acréscimo da corrente do capacitor, a tensão V_E no

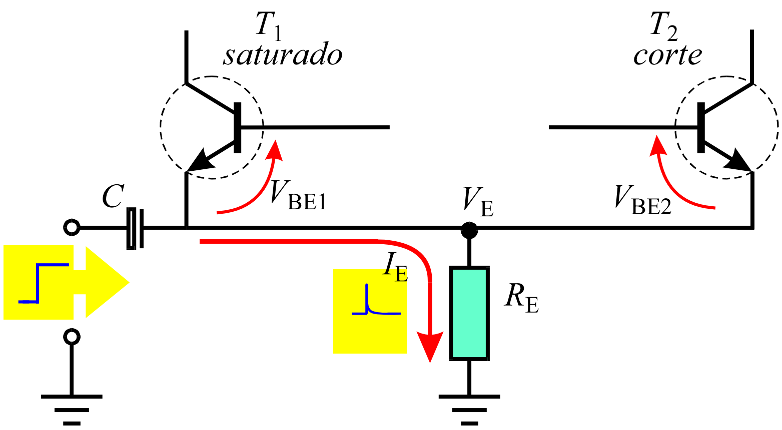


Fig.14 Corrente de carga no resistor R_E do multivibrador.

resistor sofre um rápido aumento e como resultado a tensão V_{BE1} do transistor saturado diminui.

Dependendo da amplitude do pico de tensão no emissor, a tensão V_{BE1} pode diminuir de tal forma a levar o transistor T_1 ao estado de corte. Essa condição leva obrigatoriamente o transistor T_2 à saturação. Os gráficos mostrados na **Fig.15** ilustram a dependência temporal dos sinais elétricos no circuito.

Conclui-se portanto que:

Um pulso de transição positiva provoca a troca de estados ou disparo do multivibrador biestável.

A transição de descida do pulso de entrada descarrega o capacitor, provocando um pico de tensão negativa no resistor de emissor. Esse decréscimo na tensão dos emissores **não altera o estado do multivibrador**, porque provoca um aumento na tensão base-emissor do transistor que está saturado, o que não o tira da condição de saturação.

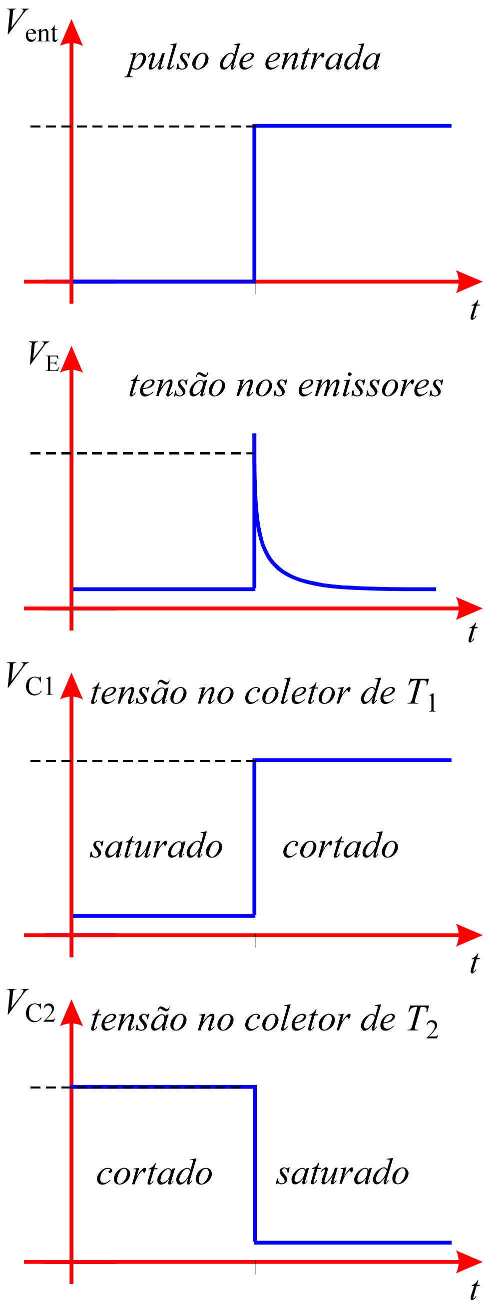


Fig.15 Sinais elétricos no multivibrador biestável.

Um pulso de transição negativa aplicado através do capacitor do circuito diferenciador de um biestável não altera o estado do circuito.

Os gráficos mostrados na **Fig.16** ilustram os sinais gerados em um biestável a partir da aplicação de um trem de pulsos na entrada do circuito diferenciador.

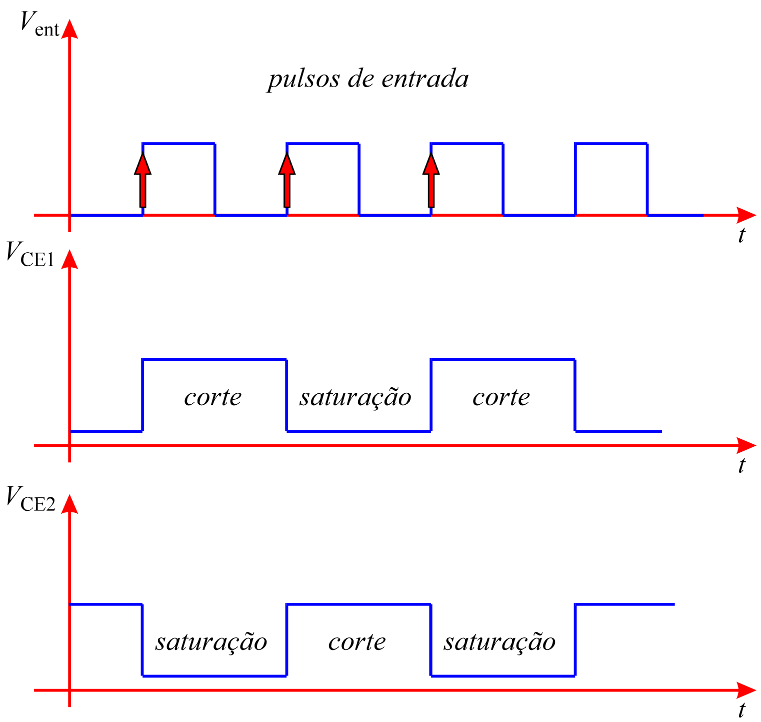


Fig.16 Formas de onda geradas no multivibrador a partir da aplicação de um trem de pulsos na entrada do circuito diferenciador.

A operação ideal do multivibrador deveria ocorrer de forma que as tensões V_{CE1} e V_{CE2}, mostradas na **Fig.16**, exibissem transições com tempos de subida e de descida praticamente nulos. Entretanto, quando um dos transistores está saturado, acumula uma grande quantidade de portadores na base. Para que o transistor entre no regime de corte, é necessário remover as cargas acumuladas, o que requer um certo intervalo de tempo. Esse intervalo de tempo corresponde ao tempo de descida na borda do pulso de tensão gerado no transistor saturado e ao tempo de subida na borda do pulso de tensão do transistor que está no regime de corte, conforme ilustrado na **Fig.17**.

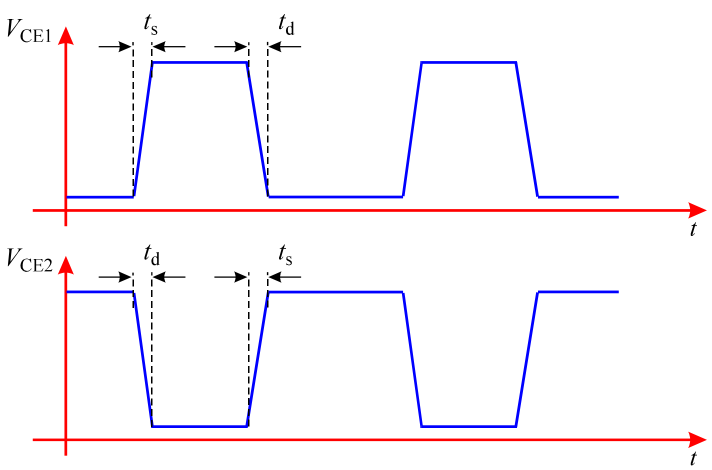


Fig.17 Formas de onda levando em conta a existência de tempos não-nulos para ocorrência das transições de estados.

Os tempos de transição podem ser diminuídos acrescentando-se capacitores em paralelo com os resistores de base, conforme ilustrado na **Fig.18**. Esses capacitores são denominados de **capacitores de aceleração ou comutação**.

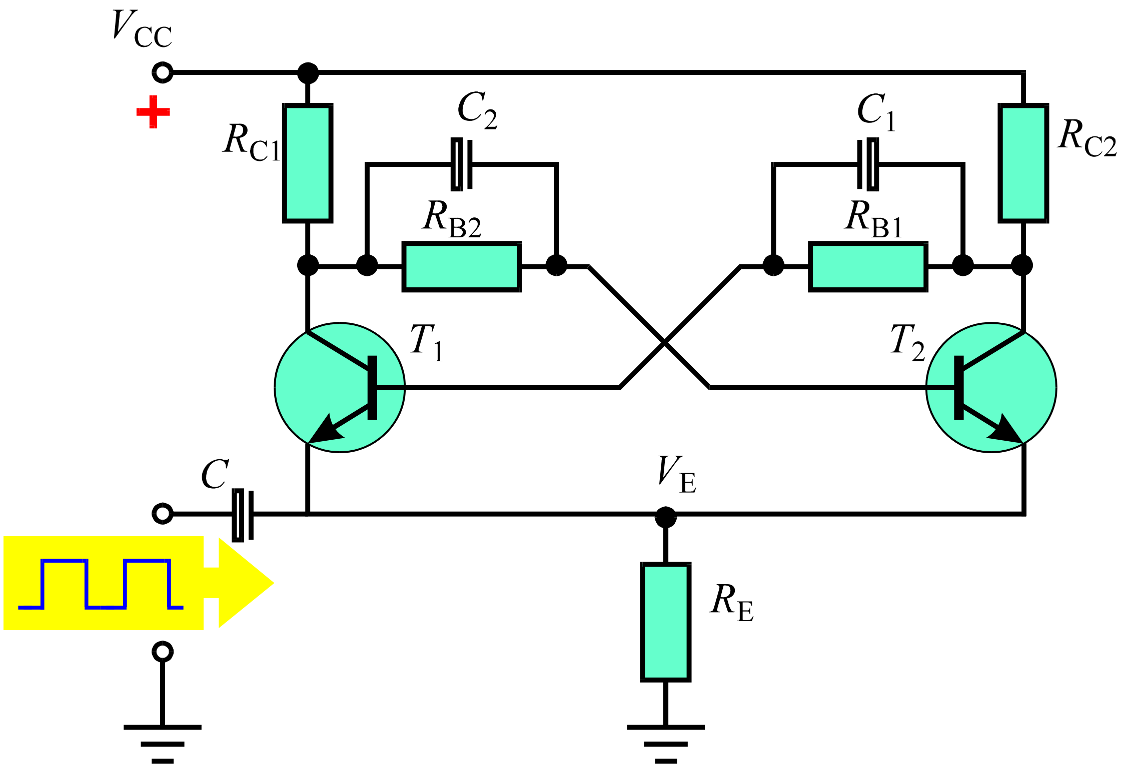


Fig.18 Multivibrador biestável com capacitores de comutação.

Os capacitores de comutação provocam a retirada rápida das cargas armazenadas na base do transistor saturado, causando uma diminuição nos tempos de subida e de descida das transições.

Os capacitores de comutação permitem uma transição mais rápida entre os estados do multivibrador biestável.

DISPARO PELA BASE

O circuito de disparo pela base utiliza uma malha diferenciadora acrescida de um diodo conectado à base de cada transistor, conforme ilustrado na **Fig.19**.

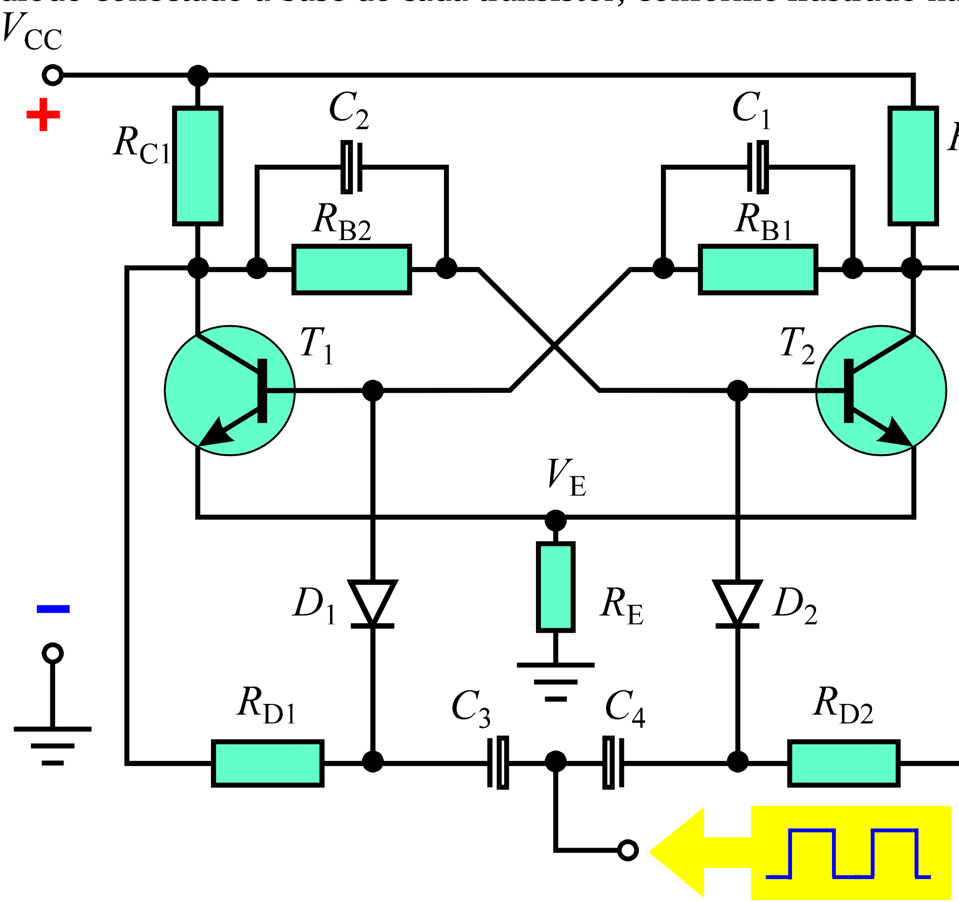


Fig.19 Multivibrador biestável com malha diferenciadora e diodos conectados às bases dos dois transistores.

O circuito de disparo é composto pelos capacitores C_3 e C_4, diodos D_1 e D_2 e resistores R_{D1} e R_{D2}, mostrados na **Fig.19**. Admite-se a condição inicial mostrada na **Fig.20**, com T_1 saturado e T_2 cortado e os parâmetros elétricos do circuito dados por:

V_{CC} = 12 V, V_E = 1 V
transistor T_1: V_{C1} = 1,3 V, V_{B1} = 1,7 V
transistor T_2: V_{C2} = 12 V, V_{B2} = 1,3 V

Da **Fig.20**, nota-se que a tensão no coletor de T_1 está presente no cátodo de D_1 e a tensão no coletor de T_2 está presente no cátodo de D_2. Sob essas condições, o diodo D_1 está submetido a uma tensão de 0,4 V, estando portanto na iminência de entrar em condução e o diodo D_2 está em bloqueio. Essa última condição impede que qualquer pico de tensão no cátodo de D_2 seja transferido para o terminal de base de T_2, sendo portanto direcionado apenas para a base do transistor T_1.

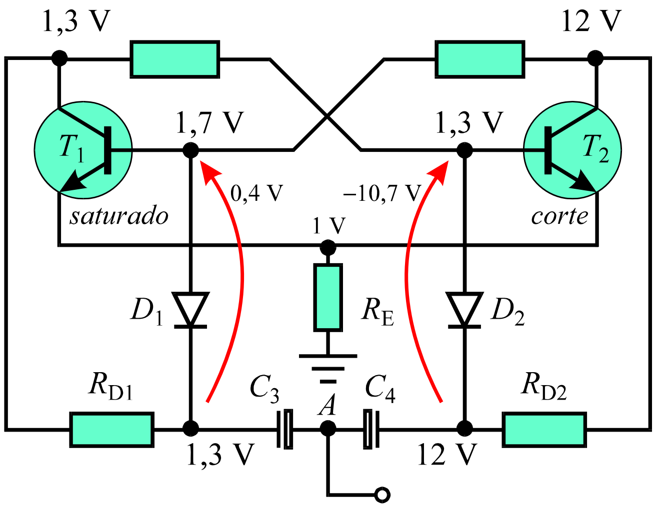


Fig.20 Condição inicial para o multivibrador biestável da **Fig.19**.

Nos circuitos de disparo pela base, a tensão de disparo é sempre dirigida à base do transistor que está saturado.

É necessário analisar como o transistor saturado reage ao pico de tensão de disparo. Assumindo uma transição positiva na tensão aplicada ao terminal *A* do capacitor, gera-se no cátodo de D_1 um pico de tensão positiva, conforme ilustrado na **Fig.21**.

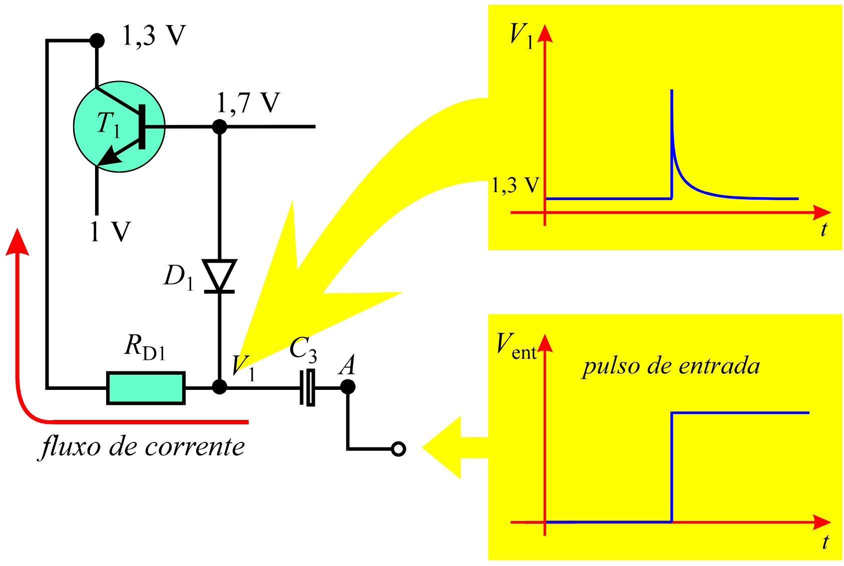


Fig.21 Efeito produzido por uma variação positiva de tensão no terminal *A* do capacitor C_3.

O diodo D_1 que está na iminência de entrar em condução, ao receber um pico de tensão positiva no cátodo, torna-se, momentaneamente, inversamente polarizado, **o que não modifica as condições de operação do transistor T_1.**

Conforme ilustrado na **Fig.22**, na transição negativa da tensão aplicada ao terminal *A* do capacitor, o potencial do cátodo de D_1 diminui, o que o coloca no regime de condução. Como em condução, a queda de tensão no diodo permanece fixada em aproximadamente 0,6 *V*, a tensão no ânodo do diodo, ou equivalentemente, no terminal de base de T_1, diminui, o que coloca T_1 no regime de corte. Isso faz que o transistor T_2 saia da condição de corte para a condição de saturação.

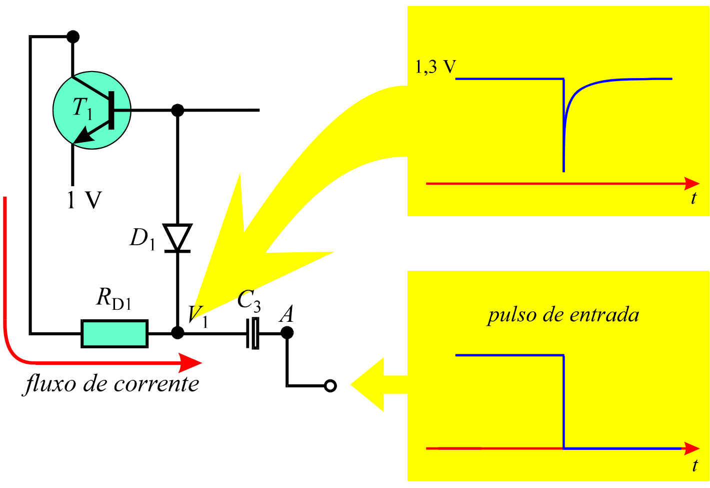


Fig.22 Efeito produzido por uma variação negativa de tensão no terminal *A* do capacitor C_3.

Cada transição negativa do pulso de disparo leva à condição de corte o transistor que estiver inicialmente saturado.

A **Fig.23** mostra as formas de onda de tensão produzidas no multivibrador biestável a partir da aplicação de um trem de pulsos no terminal *A* do circuito da **Fig.20**.

Um exame da **Fig.23** indica que 4 pulsos de disparo provocam 2 pulsos de tensão no coletor de T_1 e dois pulsos de tensão no coletor de T_2. Dessa forma, a saída de cada coletor fornece um trem de pulsos cuja freqüência é exatamente a metade da freqüência do trem de pulsos de disparo.

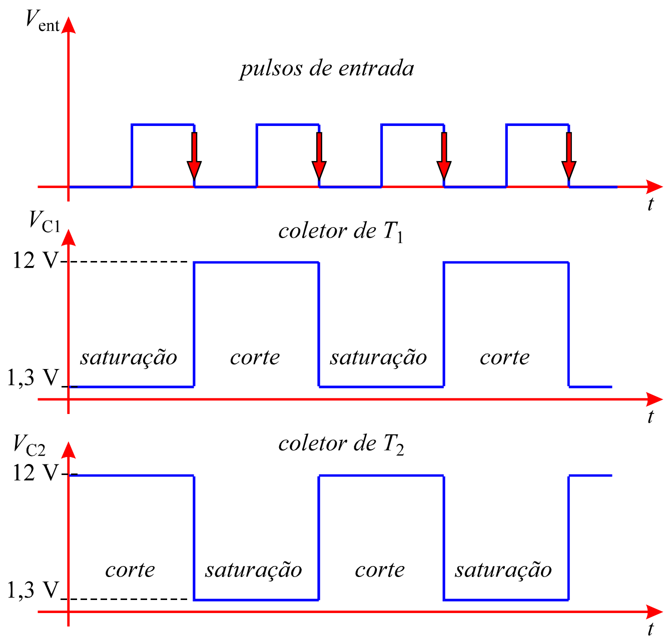


Fig.23 Formas de onda geradas em um multivibrador biestável submetido a uma seqüência de pulsos de disparo.

A freqüência do trem de pulsos gerado no coletor de cada transistor do multivibrador, é a metade da freqüência do trem de pulsos de disparo. Assim, o multivibrador biestável se comporta como um circuito divisor de freqüências.

Uma aplicação freqüente do multivibrador biestável é o circuito divisor de freqüências de uma oitava, ilustrado na **Fig.24**.

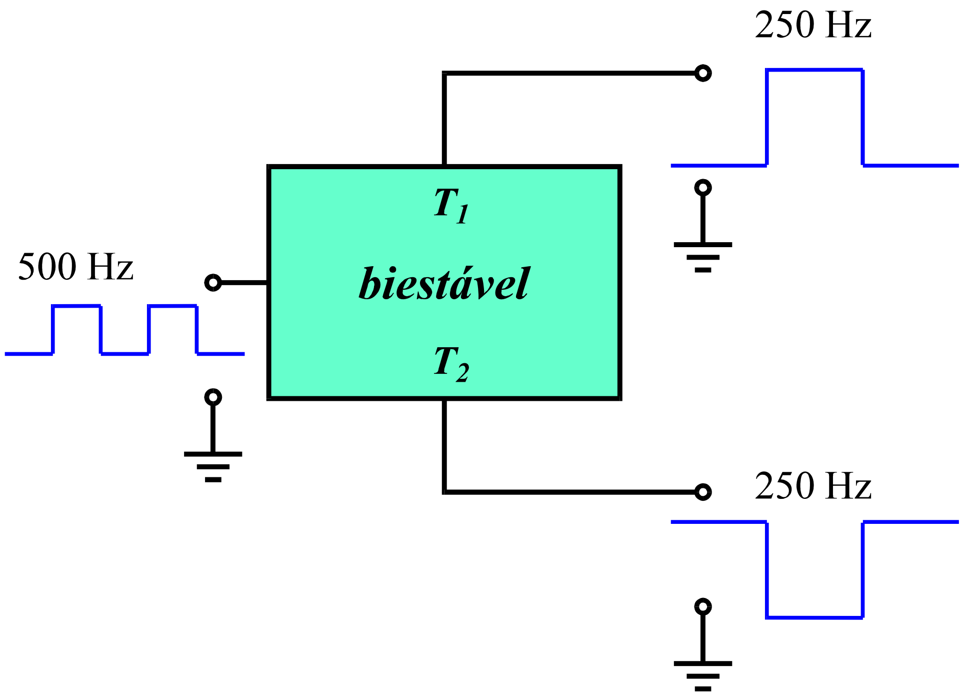


Fig.24 Multivibrador biestável utilizado como divisor de freqüências de uma oitava.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Em um circuito transistorizado polarizado por corrente de base, sob que condições se estabelecem os regimes de corte e saturação?

2. Quais são os modelos de circuito de um transistor operando nas condições de corte e saturação?

3. De que forma o transistor é geralmente utilizado em circuitos analógicos? E em circuitos digitais?

4. O que é um multivibrador biestável?

5. Se um multivibrador biestável possui transistores de ganhos distintos, qual dos dois satura ao se ligar a fonte de alimentação?

6. O que se entende por disparo de um circuito eletrônico?

7. Que métodos de disparo são empregados normalmente no multivibrador biestável?

8. Cite uma aplicação típica do multivibrador biestável.

BIBLIOGRAFIA

ARNOLD, Robert & BRANT, Arns, Transistores, segunda parte, São Paulo, EPU (1975).

DEGEM SYSTEMS, Circuitos transistorizados formadores de pulso, Israel, Eletrônica modular (1976).

STRAUS, Leonard, Wave generation and shaping, São Paulo, 2ª edição, McGraw-Hill, Inc. (1970).

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Introdução

Alguns edifícios utilizam um tipo especial de circuito para o acionamento das lâmpadas de corredor. Quando ligadas por um indivíduo, as lâmpadas voltam a apagar-se depois de determinado intervalo de tempo, assim permanecendo até que o interruptor seja novamente acionado.

O multivibrador monoestável é um temporizador que permite, por exemplo, implementar o controle de iluminação descrito anteriormente, e este fascículo trata do princípio de funcionamento desse circuito.

Para a boa compreensão do conteúdo e desenvolvimento das atividades contidas neste fascículo, o leitor deverá estar familiarizado com os conceitos relativos a:

- Dinâmica de carga e descarga em capacitores.
- Circuito integrador e diferenciador.
- Multivibrador biestável.

Multivibrador monoestável

O multivibrador monoestável é um circuito que possui um estado estável e outro semi-estável que dura apenas um determinado intervalo de tempo. Um dos estados permanece estável na ausência de um estímulo externo. A aplicação de um pulso de disparo de curta duração leva o circuito a um estado semi-estável que dura certo intervalo de tempo, após o qual o circuito retorna ao seu estado estável, conforme ilustrado na **Fig.1**.

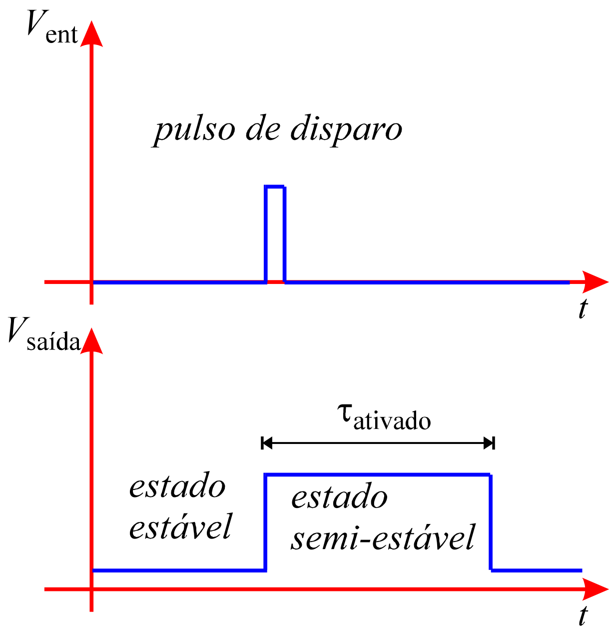


Fig.1 Tensão gerada em um multivibrador monoestável submetido a um pulso de disparo.

O tempo $\tau_{ativado}$ indicado na **Fig.1** corresponde ao tempo de permanência no estado semi-estável, e depende dos parâmetros elétricos dos elementos de circuito.

A **Fig.2** mostra um tipo de multivibrador monoestável alimentado apenas por uma fonte *cc*. É importante observar que esse circuito possui apenas um elo de realimentação resistivo, entre o coletor de T_2 e a base de T_1. O outro elo de realimentação é feito através de um capacitor.

O capacitor C_1 mostrado na **Fig.2** é um elemento fundamental do monoestável, conforme discutido a seguir.

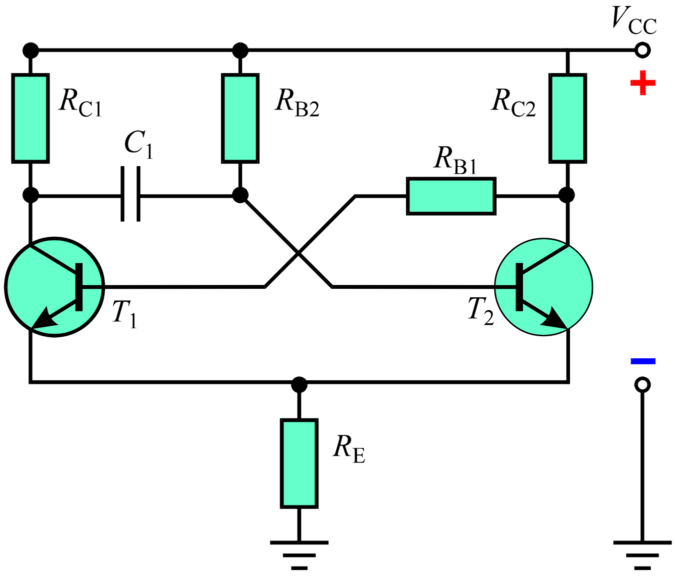


Fig.2 Diagrama de circuito de um multivibrador monoestável.

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

ESTADO DE REPOUSO

A princípio não é possível determinar o estado inicial do multivibrador monoestável. Portanto, para analisar o comportamento do circuito, admite-se inicialmente a existência do estado estável, com T_2 saturado e T_1 no regime de corte, e os parâmetros elétricos indicados na **Fig.3**.

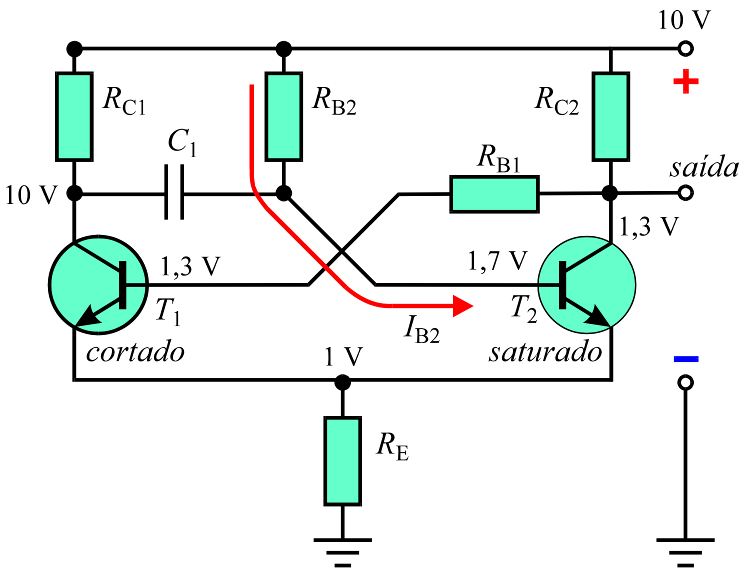


Fig.3 Exemplo de um multivibrador monoestável operando no estado estável.

Admite-se que as condições de operação do circuito da **Fig.3** resultam em uma queda de tensão de 1 V no resistor R_E. Dessa forma, para que o transistor T_2 esteja saturado, e T_1 no regime de corte, as condições listadas na **Tabela 1** devem ser satisfeitas.

Tabela 1 Potenciais elétricos nos terminais dos transistores da **Fig.3**.

Potencial	Transistor T_1	Transistor T_2
V_E	1,0 V	1,0 V
V_B	1,3 V	1,7 V
V_C	10 V	1,3 V
$V_{BE} = V_B – V_E$	0,3 V (corte)	0,7 V (saturação)
$V_{CE} = V_C – V_E$	9,0 V (corte)	0,3 V (saturação)

Na **Fig.3**, o capacitor C_1 está carregado, bloqueando portanto o fluxo de corrente entre os seus terminais. Como a tensão V_{BE1} = 0,3 V no transistor T_1 é muito pequena para provocar a condução na junção base-emissor daquele transistor, o transistor T_1 permanece no regime de corte. Dessa forma a corrente de base I_{B2} necessária para a saturação de T_2 flui inteiramente através de R_{B2}, conforme se pode observar na **Fig.3**, o que configura a condição de estabilidade do circuito.

O estado estável permanece inalterado enquanto não houver um estímulo externo. Alguns autores denominam o estado estável do multivibrador monoestável de **estado de repouso**.

Um multivibrador monoestável permanece no estado de repouso enquanto não receber um pulso de disparo externo.

Os gráficos mostrados na **Fig.4** ilustram a dependência com o tempo das tensões existentes nos dois transistores durante o estado estável.

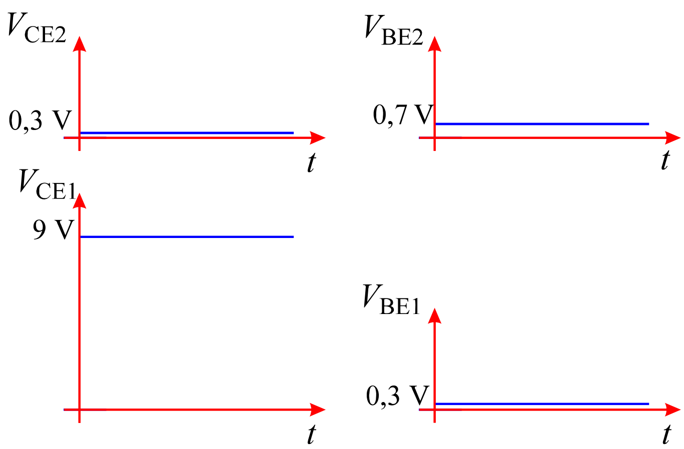


Fig.4 Tensões nos transistores da **Fig.3** durante a permanência do circuito no estado estável.

DISPARO DO MONOESTÁVEL

Um pulso de disparo de curta duração, adequadamente aplicado, é capaz de produzir a passagem do circuito monoestável para o estado semi-estável.

Para analisar o comportamento do circuito perante um estímulo externo, é fundamental notar que o capacitor C_1 está inicialmente carregado e submetido a uma tensão de 8,3 V, conforme indicado na **Fig.5**. Como pode ser aí observado, essa condição mantém o terminal *a* do capacitor a um potencial de 10 V, que é 8,3 V superior ao potencial de 1,7 V do terminal *b*.

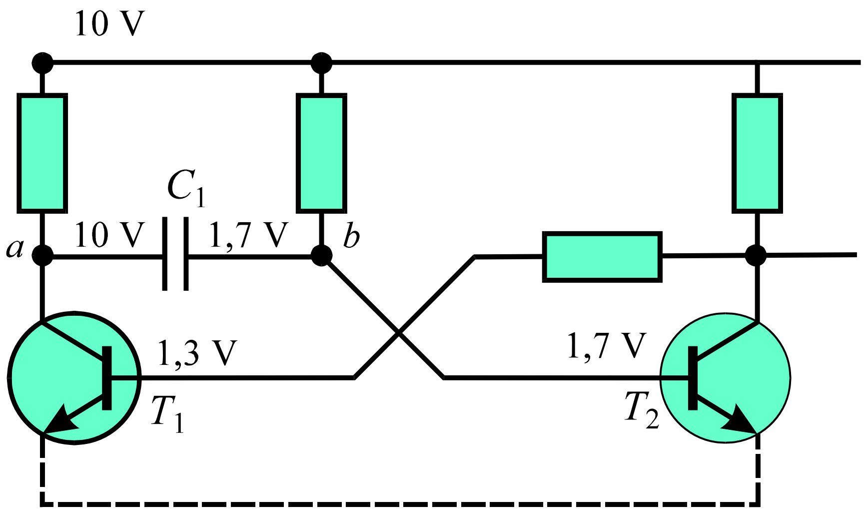


Fig.5 Porção simplificada do circuito da **Fig.3**.

Existem várias maneiras possíveis de disparar o monoestável, incluindo:

- A aplicação de um pico de tensão positiva no emissor de ambos os transistores.
- A aplicação de um pico de tensão negativa na base do transistor saturado.

Um pico de tensão positiva nos emissores dos transistores pode ser obtido através de um circuito diferenciador, de forma semelhante àquela adotada para disparar um multivibrador biestável.

A **Fig.6** mostra um circuito diferenciador, formado pelo capacitor C_E e o resistor R_E, utilizado para provocar o disparo do monoestável, através dos emissores dos dois transistores.

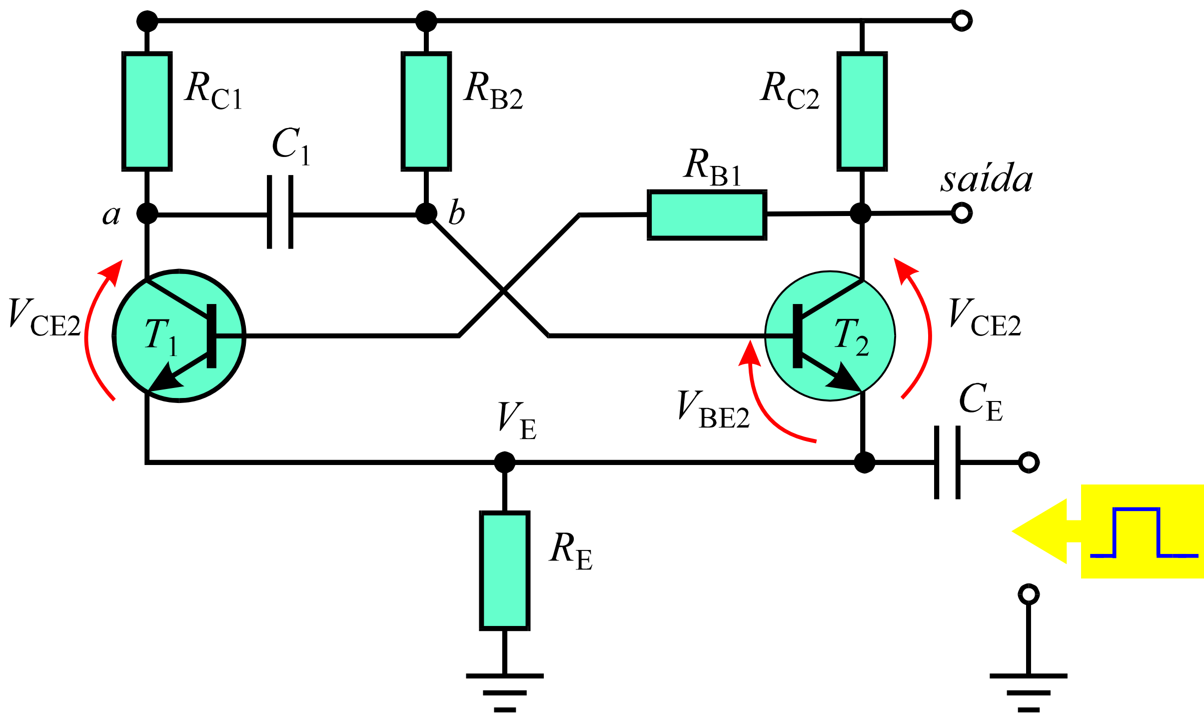


Fig.6 Multivibrador monoestável, com circuito diferenciador de disparo.

Na transição positiva do pulso de entrada, mostrado na **Fig.6**, o diferenciador provoca um pico de tensão positiva nos emissores dos dois transistores. O rápido aumento no potencial do terminal do emissor do transistor T_2 provoca uma súbita diminuição da tensão V_{BE2}, que atinge um valor praticamente nulo. A **Fig.7** mostra os sinais gerados nos terminais de T_2, a partir da aplicação do pulso de disparo.

Essa súbita diminuição em V_{BE2} faz que o transistor T_2 passe rapidamente da condição de saturação para a condição de corte, o que provoca brusco aumento na tensão V_{CE2}.

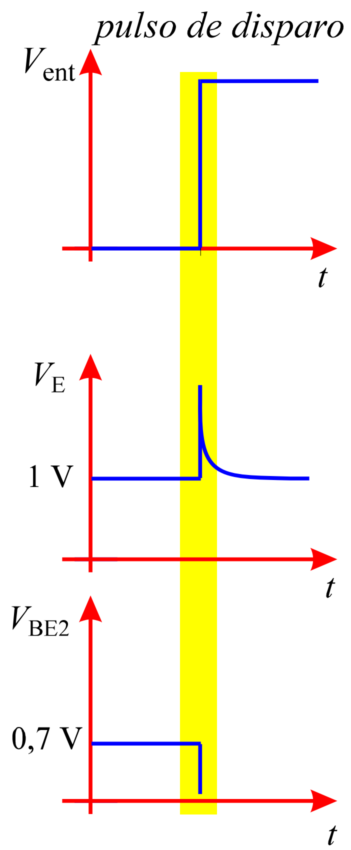


Fig.7 Sinais inicialmente gerados no transistor T_2 por um pulso de disparo.

Como resultado, o alto valor do potencial do terminal de coletor de T_2 provoca grande aumento na corrente I_{B1} que flui para o terminal de base de T_1 que o leva rapidamente à condição de saturação, conforme ilustrado na **Fig.8**. O circuito dessa forma troca de estado, com o transistor T_1 saturando e o transistor T_2 entrando no regime de corte.

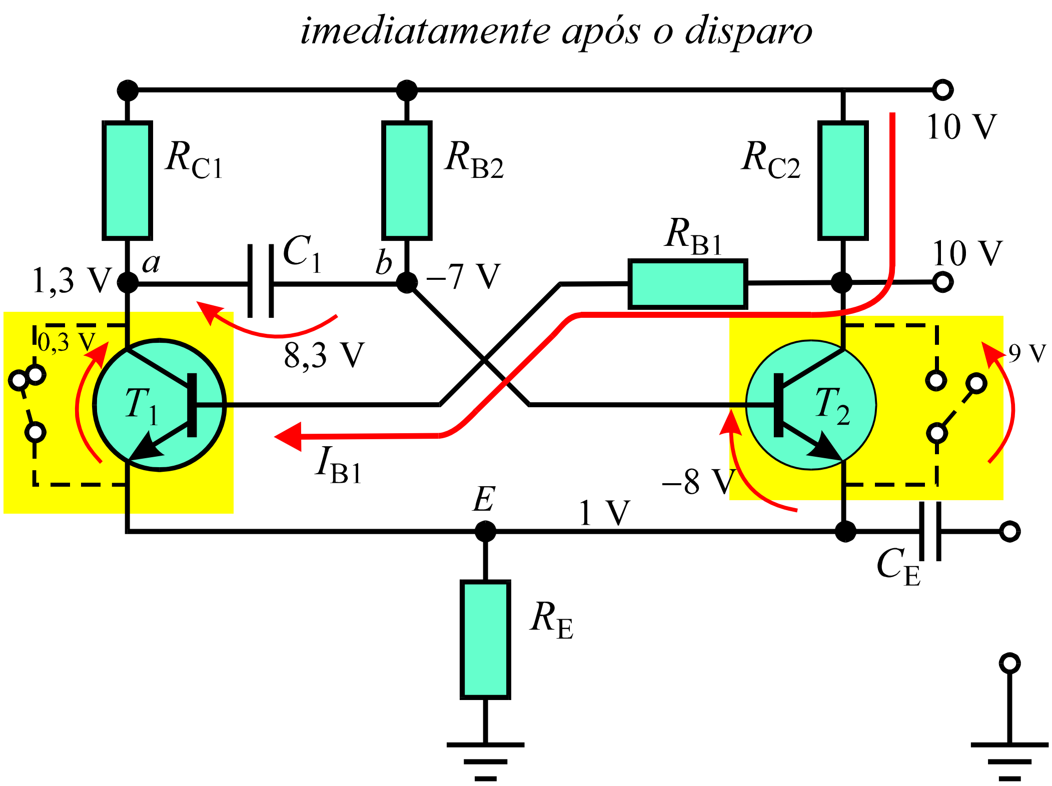


Fig.8 Estado produzido no multivibrador, imediatamente após a aplicação de um pulso de disparo na entrada do circuito.

Como o pico de tensão de disparo é de curta duração, em princípio o circuito tenderia a voltar imediatamente ao seu estado estável. Entretanto, ao saturar, o transistor T_1, que agora se comporta como uma chave fechada, praticamente curto-circuita o terminal *a* do capacitor ao terminal *E*, comum aos dois emissores, conforme se pode observar na **Fig.8**.

Uma vez que o capacitor não pode descarregar-se instantaneamente, a tensão entre seus terminais tende a permanecer no valor inicial de 8,3 V. Com base na **Fig.8**, a condição de saturação de T_1 implica $V_{CE1} \approx 0{,}3$ V, de forma que **o terminal *b* do capacitor fica submetido a um potencial elétrico 8,0 V inferior ao terminal *E* do circuito,** como indicado na **Fig.8.**

Como o terminal *b* do capacitor está conectado à base de T_2, tem-se que

$$V_{BE1} = V_b - V_E = -8\ \text{V}$$

indicando que a junção base-emissor do transistor T_2 fica momentaneamente submetida a uma tensão negativa. As alterações induzidas em T_2 pelo pulso de disparo estão representadas na **Fig.9**.

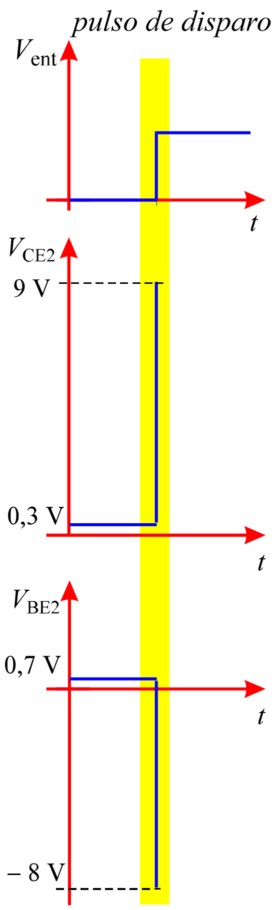


Fig.9 Tensões induzidas sobre T_2, durante a transição do pulso de disparo.

É importante notar que o valor negativo da tensão V_{BE2} não altera a condição de corte do transistor T_2, após o término da transição do pulso de entrada. Dessa forma, o circuito permanece **ativado** em um estado semi-estável, conforme ilustrado na **Fig.10**.

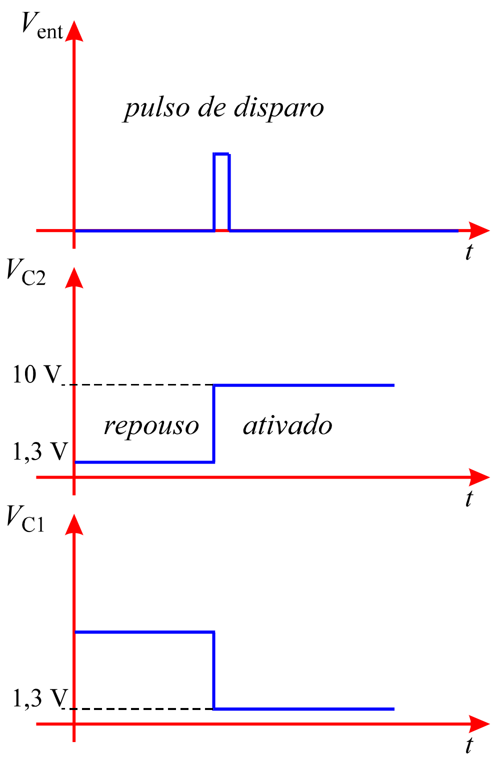


Fig.10 Sinais induzidos no multivibrador.

O tempo que o monoestável permanece ativado, depende dos valores da capacitância C_1 e da resistência R_{B2}, porque assim que T_1 satura, a armadura negativa de C_1 começa a acumular a carga resultante da corrente que flui através de R_{B2}, conforme ilustrado na **Fig.11**.

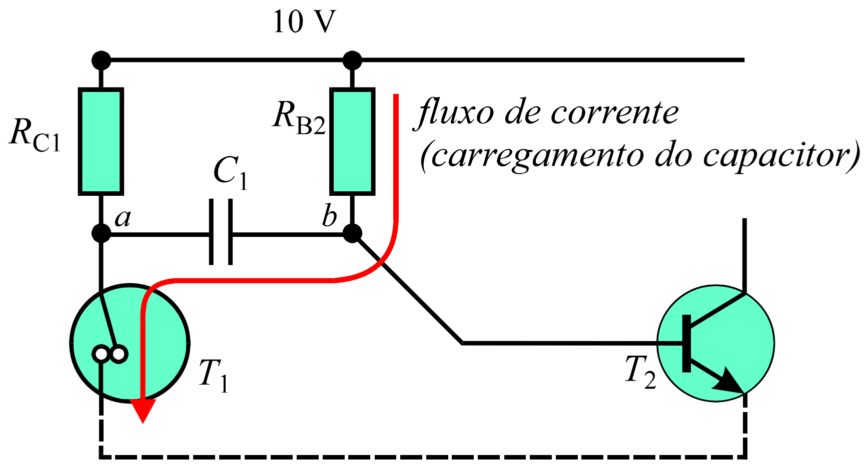


Fig.11 Fluxo de corrente através do capacitor C_1 do multivibrador.

A corrente de carga do capacitor começa a aumentar o potencial do terminal *b* de C_1, provocando o mesmo efeito no terminal da base de T_2, conforme ilustrado na **Fig.12**.

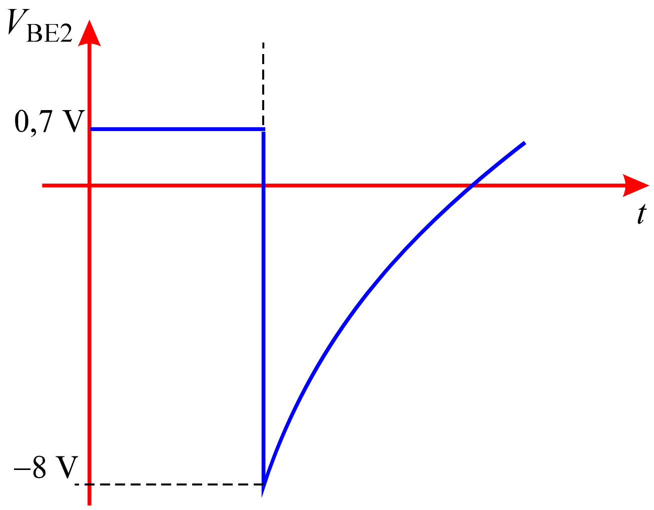


Fig.12 Dependência temporal da tensão V_{BE1}, resultante do processo de carga do capacitor C_1 do multivibrador.

Como se pode observar na **Fig.12**, após algum tempo, o potencial do terminal *b* do capacitor torna-se novamente positivo, até que a tensão V_{BE2} atinja novamente o valor de 0,7 V, suficiente para promover T_2 à condição de saturação, o que corresponde a transição do transistor T_1 de volta ao regime de corte.

O tempo que o sistema permanece ativado pode ser determinado a partir de uma análise da dinâmica de carga do capacitor da **Fig.11**. Dessa análise, conclui-se que, para um valor qualquer da tensão de alimentação V_{CC}, o tempo de permanência do sistema no estado ativado é dado por

$$\tau_{ativado} = R_{B2} C_1 \ln\left(\frac{2V_{CC} - V_\gamma}{V_{CC} - V_\gamma}\right) \quad (1)$$

onde V_γ é a tensão base-emissor que satura o transistor T_2, e que vale 0,7 V para transistores de silício.

Para o caso da **Fig.11**, V_{CC} = 10 V, satisfazendo a condição $V_{CC} >> V_\gamma$. Sendo essa a situação que ocorre na prática, podem-se fazer as seguintes aproximações:

$$2V_{CC} - V_\gamma \approx 2V_{CC}$$
$$V_{CC} - V_\gamma \approx V_{CC}$$

e a **Eq.(1)** assume a forma aproximada

$$\tau_{ativado} = R_{B2} C_1 \ln 2$$

ou equivalentemente,

$$\tau_{ativado} = 0{,}693 R_{B2} C_1 \quad (2)$$

É importante notar da **Eq.(2)** que nessa aproximação, o tempo de permanência do sistema no estado ativado é praticamente independente do valor da tensão de alimentação do monoestável.

Imediatamente após o corte do transistor T_1, o capacitor C_1 começa a se carregar através do resistor R_{C1}, conforme indicado na **Fig.13**. Nesse processo, a tensão no coletor de T_1 aumenta até atingir o valor da tensão de alimentação. O tempo de recuperação do sistema τ_{rec}, corresponde a aproximadamente cinco constantes de tempo da malha do circuito indicada na **Fig.13**, ou seja,

$$\tau_{rec} = 5 R_{C1} C_1 \quad (3)$$

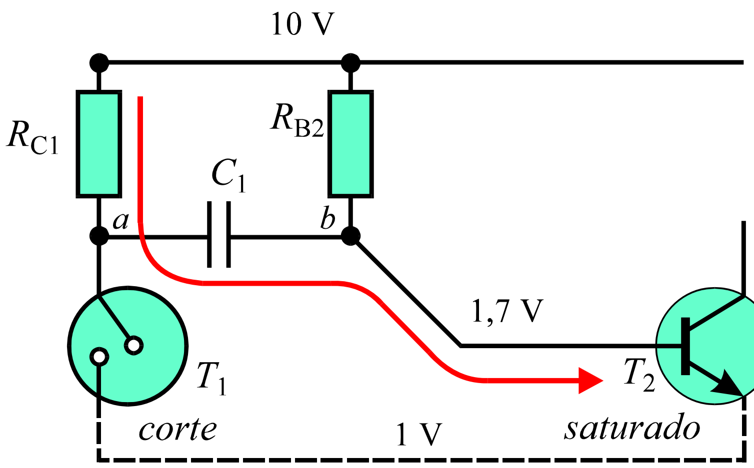


Fig.13 Processo de carga do capacitor C_1 durante a recuperação do estado estável do multivibrador.

A **Fig.14** mostra as formas de onda geradas no multivibrador a partir da aplicação do pulso de disparo nos terminais emissores dos transistores do circuito.

O multivibrador monoestável é muito utilizado, por exemplo, na implementação de circuitos de acionamento temporário de lâmpadas de corredor em edifícios residenciais ou comerciais. As lâmpadas são acionadas quando um indivíduo toca no botão do interruptor, o que produz o pulso de disparo de curta duração para o circuito monoestável. Nesses sistemas, as lâmpadas permanecem acesas durante um tempo tipicamente não superior a 1 minuto, tempo em geral suficiente para que o indivíduo já se tenha retirado do corredor.

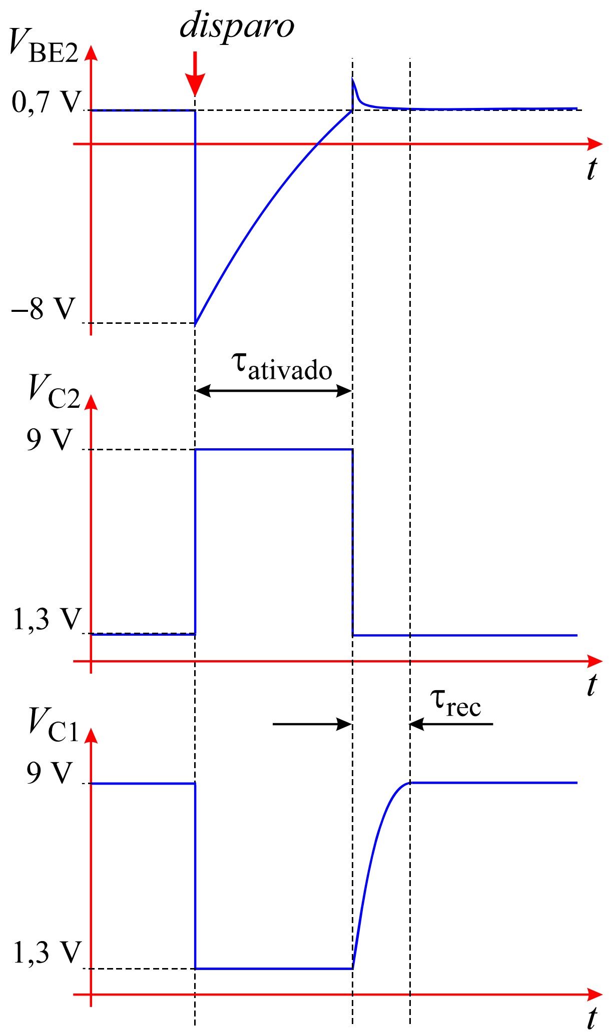


Fig.14 Tensões induzidas no monoestável pela aplicação de um pulso de disparo.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Faça o diagrama básico de circuito de um multivibrador monoestável.

2. Qual é a diferença fundamental entre os circuitos multivibradores biestável e monoestável?

3. Admitindo que os elementos de circuito da **Fig.3** sejam dados por R_{B2}=10 kΩ, R_{C1}=1 kΩ e C_1=10µF, e assumindo a aplicação de um pulso de disparo no multivibrador, determine:

   (a) o valor exato do tempo que o circuito permanece no estado ativo.

   (b) o valor aproximado correspondente.

   (c) o tempo de recuperação do estado estável do sistema.

BIBLIOGRAFIA

STRAUS, Leonard, Wave generation and shaping, 2ª. edição, Nova York, McGraw-Hill, 1970.

MILLMAN, Jacob e TAUB, Herbert, Pulse, digital, and switching waveforms, Nova York, McGraw-Hill, 1965.

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Introdução

Nos fascículos anteriores foram estudados os multivibradores biestável e monoestável. Conforme a análise anterior demonstrou, a alteração dos estados daqueles circuitos requer o emprego de um gerador de pulsos aplicados às entradas de cada circuito.

Este fascículo tratará do multivibrador astável, cuja principal utilização é justamente na geração de uma seqüência de pulsos retangulares semelhantes àqueles aplicados à entrada de cada circuito multivibrador estudado anteriormente.

O multivibrador astável é largamente empregado em circuitos digitais como, relógios, calculadoras etc., o que demonstra a importância do estudo de seu funcionamento e do conhecimento de suas características.

Para a boa compreensão do conteúdo e desenvolvimento das atividades contidas neste fascículo, o leitor deverá estar familiarizado com os conceitos relativos a:

- Dinâmica de carga e descarga em capacitores.
- Multivibrador biestável.
- Multivibrador monoestável.

Multivibrador astável

O multivibrador astável é um circuito que possui dois estados semi-estáveis. Em outras palavras, o circuito exibe uma alternância de estados como função do tempo, **mesmo na ausência de estímulos externos**.

A **Fig.1** mostra um circuito típico do multivibrador astável, onde se pode notar a existência dos capacitores C_1 e C_2 conectados às bases dos dois transistores. Esses capacitores são elementos essenciais para manter o circuito alternando entre seus dois estados possíveis, conforme examinado a seguir.

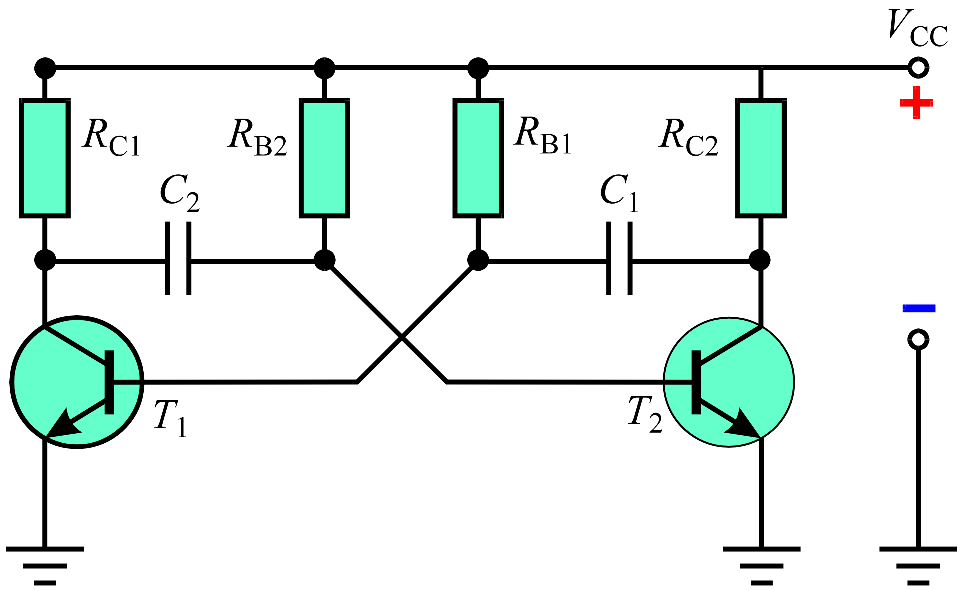


Fig.1 Circuito típico de um multivibrador astável.

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Não é possível prever o estado inicial do multivibrador astável imediatamente após a aplicação da tensão externa de alimentação. Uma forma de analisar o princípio de funcionamento do circuito é admitir um determinado estado inicial. Para isso, considera-se que o circuito esteja inicialmente no estado indicado na **Fig.2**, que corresponde a:

- T_1 saturado e T_2 no regime de corte.
- Capacitores C_1 e C_2 descarregados.

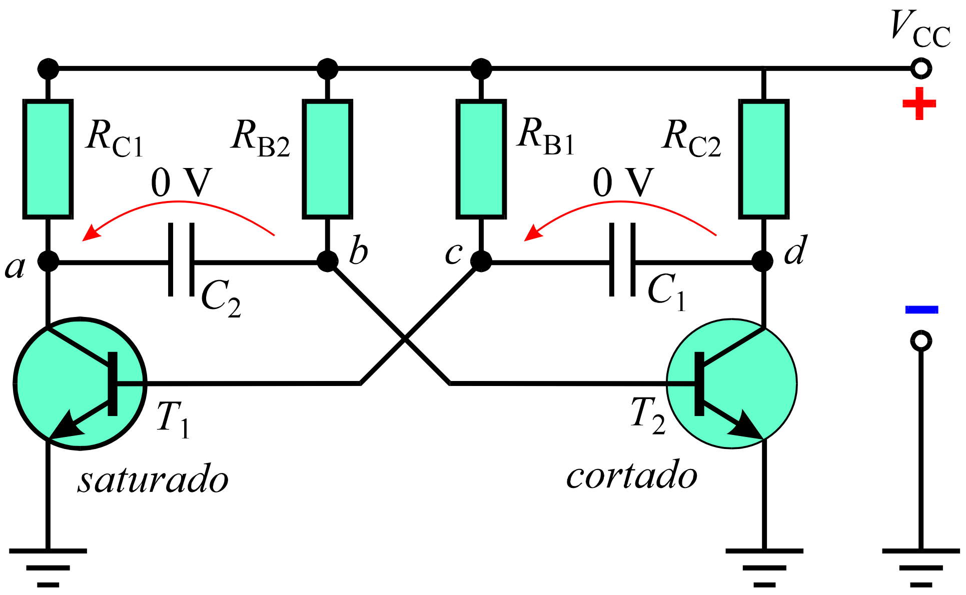


Fig.2 Multivibrador astável submetido a um dado estado inicial.

O transistor T_2 estando no regime de corte, comporta-se como um interruptor aberto. O terminal *d* do capacitor C_1 está conectado ao pólo positivo da fonte através de R_{C2} e o lado *c* ao terra através da junção base-emissor de T_1. Assim, o capacitor C_1 começa a carregar-se. A **Fig.3** mostra o caminho percorrido pela corrente de carga de C_1, com T_2 sendo representado por um interruptor aberto.

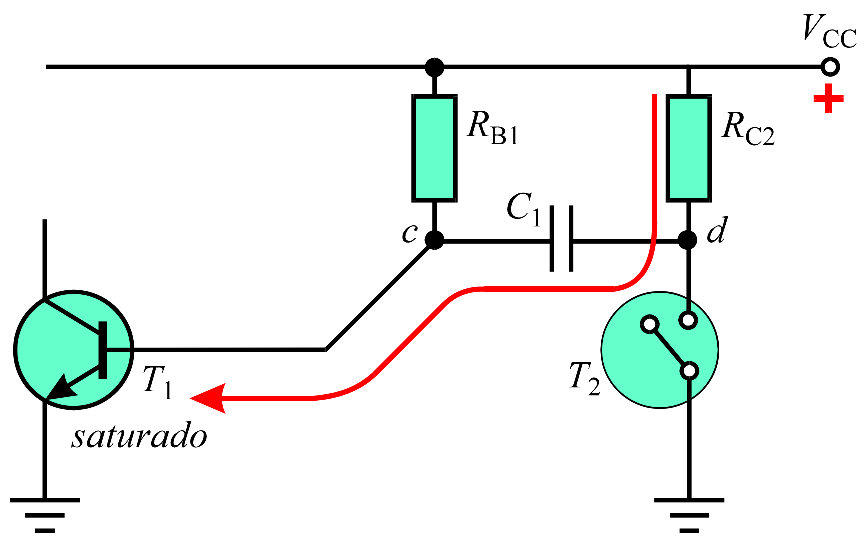


Fig.3 Início do processo de carga de C_1 no multivibrador astável.

Como os resistores de coletor são geralmente de baixa resistência (tipicamente centenas de ohms a alguns kiloohms), e com a junção base-emissor em condução exibindo baixa resistência, o processo de carga de C_1 ocorre rapidamente. Assim, a tensão V_{CE2} atinge rapidamente o valor da tensão V_{CC}, conforme ilustrado na **Fig.4**.

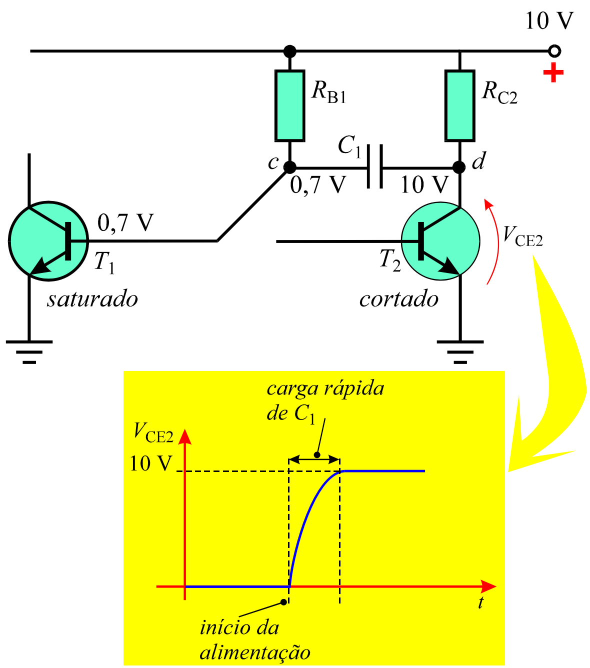


Fig.4 Processo de carga de C_1 e evolução no tempo da tensão V_{CE2}.

Considerando-se a situação indicada na **Fig.4**, em que V_{CC} = 10 V, o potencial do terminal *c* do capacitor C_1 se torna 9,3 V inferior ao potencial do terminal *d*.

O transistor T_1 saturado, por sua vez, mantém o potencial do terminal *a* de C_2 próximo ao potencial de terra, conforme indicado na **Fig.5**. Como o terminal *b* de C_2 é alimentado através de R_{B2}, inicia-se um processo de carga sobre C_2. Como a resistência R_{B2} tem valor alto (tipicamente dezenas ou centenas de kiloohms), o processo de carga de C_2 ocorre lentamente, conforme mostrado na **Fig.5**.

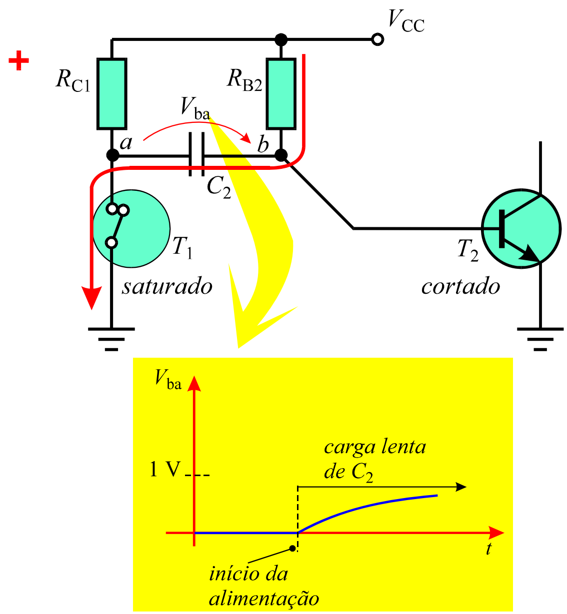


Fig.5 Processo de carga e evolução no tempo da tensão sobre C_2.

À medida que o tempo passa, o terminal *b* do capacitor vai **lentamente** se tornando positivo em relação ao terminal *a*. Como o terminal *b* está conectado à base de T_2, quando a tensão no capacitor atingir cerca de 0,5 V, T_2 estará na iminência de sair do regime de corte para o regime de saturação conforme ilustrado na **Fig.6**

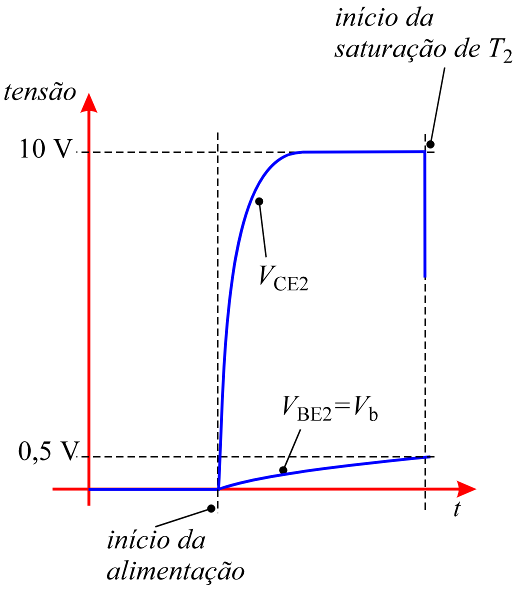


Fig.6 Evolução no tempo das tensões V_{BE2} e V_{CE2} durante a carga de C_2.

Com base na **Fig.2**, à medida que T_2 satura, o terminal *d* do capacitor C_1 se torna cada vez mais próximo do potencial de terra.

Como o terminal *c* de C_1 tem um potencial 9,3V inferior ao terminal *d*, a tensão $V_{BE1} = V_c$ torna-se cada vez menor a medida que $V_d \rightarrow 0$, tornando-se eventualmente negativa, conforme mostrado na **Fig.7**.

Com a tensão V_{BE1} tornando-se negativa, T_1 que estava saturado entra rapidamente no regime de corte e com a troca de estados dos dois transistores os resistores de carga dos capacitores se alteram, conforme ilustrado na **Fig.8**.

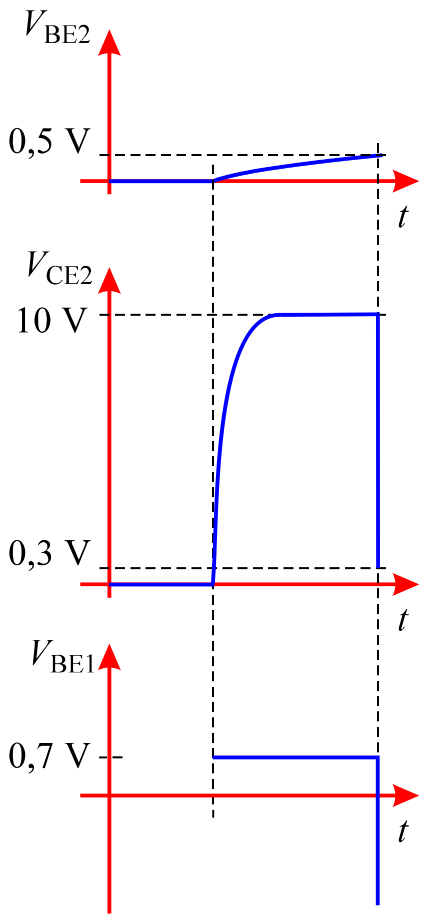


Fig.7 Evolução no tempo de V_{BE2}, V_{CE2} e V_{BE1} durante a saturação de T_2.

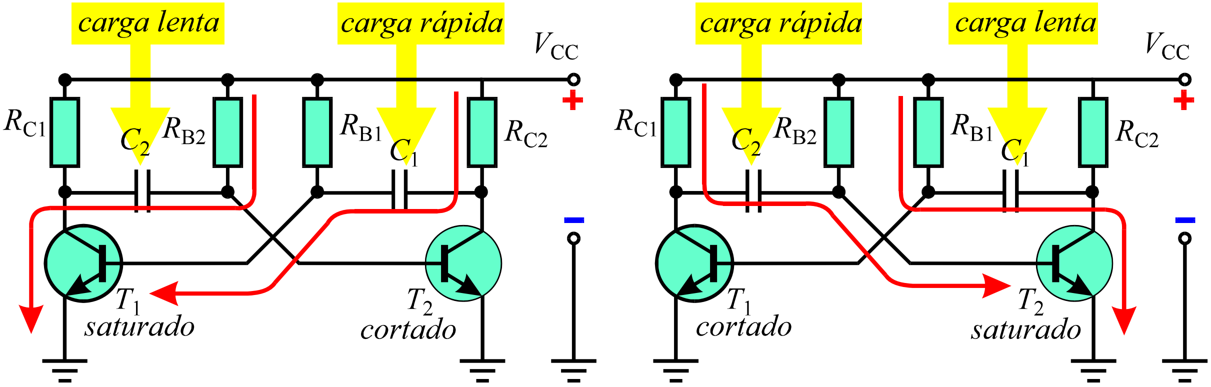


Fig.8 Processos de carga dos capacitores do multivibrador astável durante a permanência dos estados semi-estáveis.

A corrente de carga rápida de C_2 através de T_2 completa o processo de saturação de T_2 elevando a tensão V_{BE2} ao valor de 0,7V, enquanto o potencial negativo na base de T_1 o mantém no regime de corte.

A **Fig.9** mostra a evolução no tempo das tensões base-emissor e coletor-emissor em ambos os transistores.

Durante o processo de carregamento lento de C_1, a tensão negativa V_{BE1} que mantém T_1 no regime de corte aumenta até se tornar positiva, conforme ilustrado na **Fig.10**. Como pode ser aí observado, quando a tensão na base de T_1 se torna

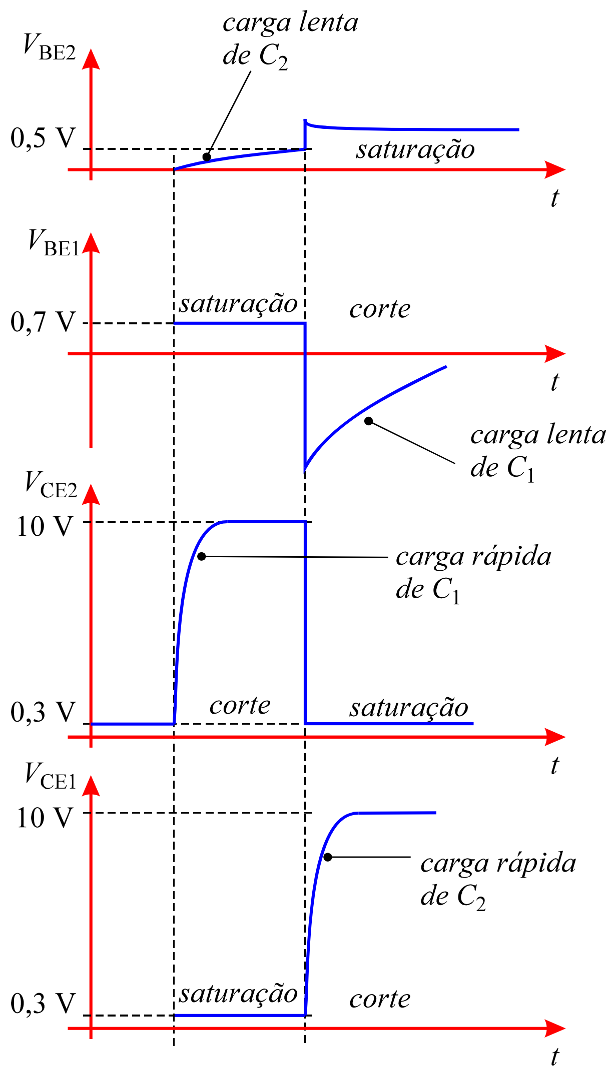


Fig.9 Evolução no tempo das tensões base-emissor e coletor-emissor nos transistores do multivibrador astável.

positiva e atinge o valor de 0,5V, T_1 entra no regime de condução, eventualmente atingindo o estado de saturação.

Isso faz que a base de T_2 fique submetida ao potencial negativo acumulado no terminal *b* do capacitor C_2, conforme já discutido anteriormente.

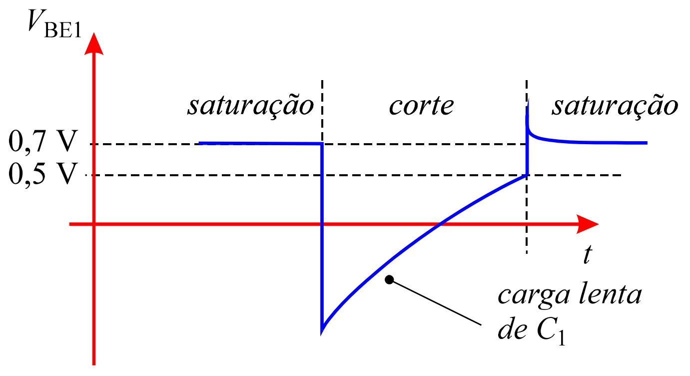


Fig.10 Evolução no tempo da tensão V_{BE1}.

A **Fig.11** ilustra as formas de onda associadas às tensões V_{BE1} e V_{BE2}.

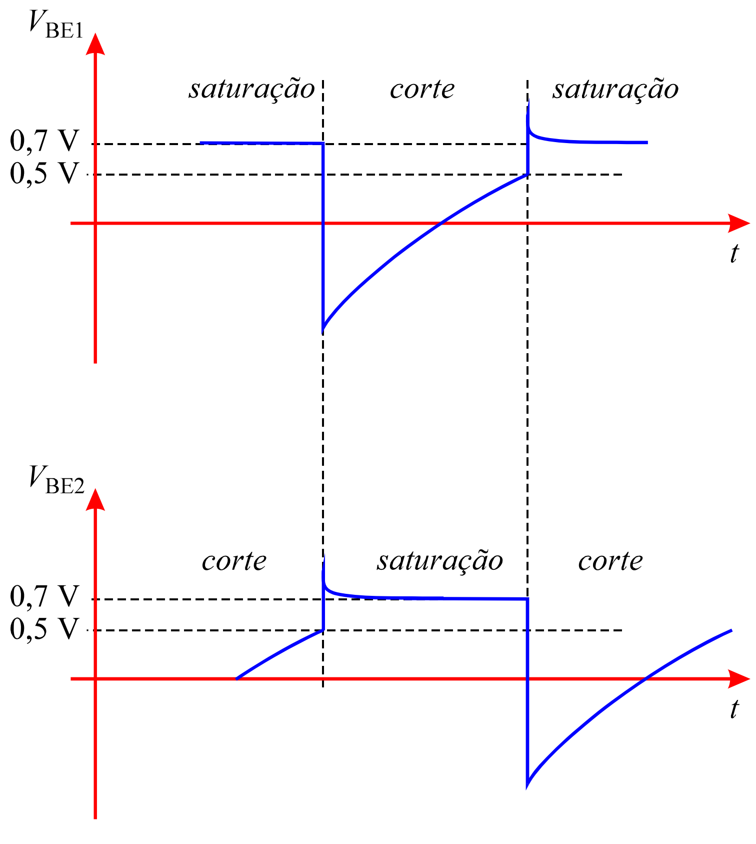
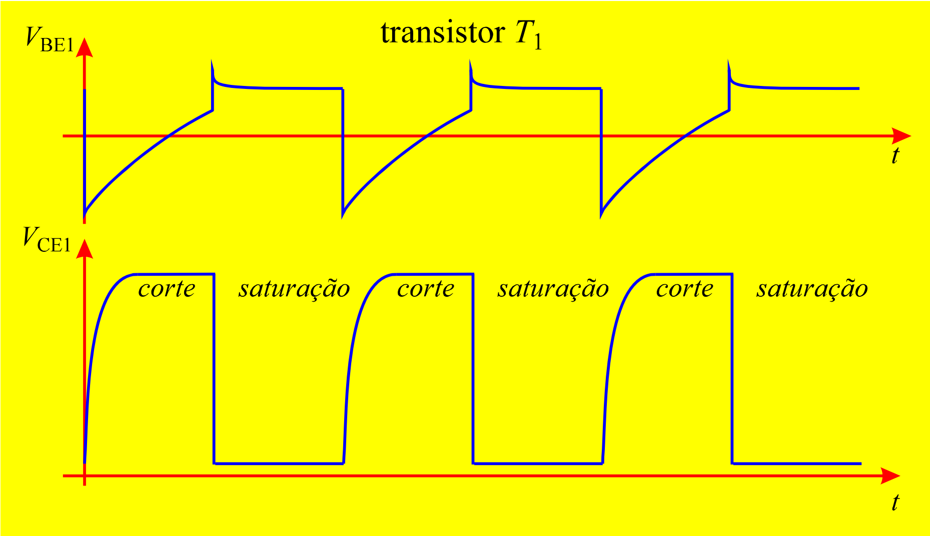


Fig.11 Dependência temporal das tensões base-emissor no multivibrador astável.

O processo descrito anteriormente evolui periodicamente, sem a necessidade de um estímulo externo. As formas de onda geradas pelo circuito estão mostradas em mais detalhe na **Fig.12**.



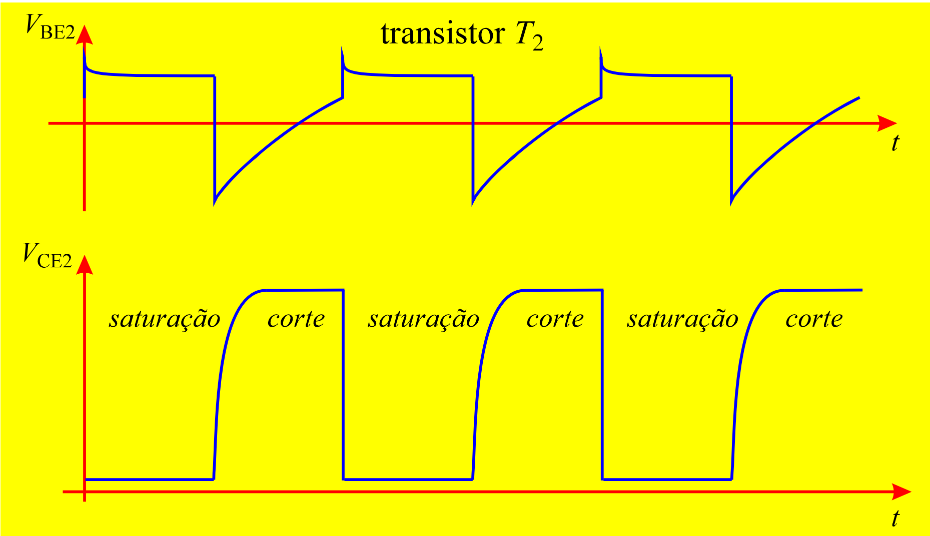


Fig.12 Gráficos detalhados das formas de onda produzidas pelo multivibrador astável.

O tempo que cada transistor permanece no regime de corte depende da resistência e capacitância associadas à sua base. As formas de onda terão tempos idênticos de corte e saturação, se os resistores e capacitores satisfizerem à condição

$$R_{B1}C_1 = R_{B2}C_2 \tag{1}$$

Sob essa condição, as tensões V_{CE1} e V_{CE2} evoluem no tempo, conforme ilustrado na **Fig.13**.

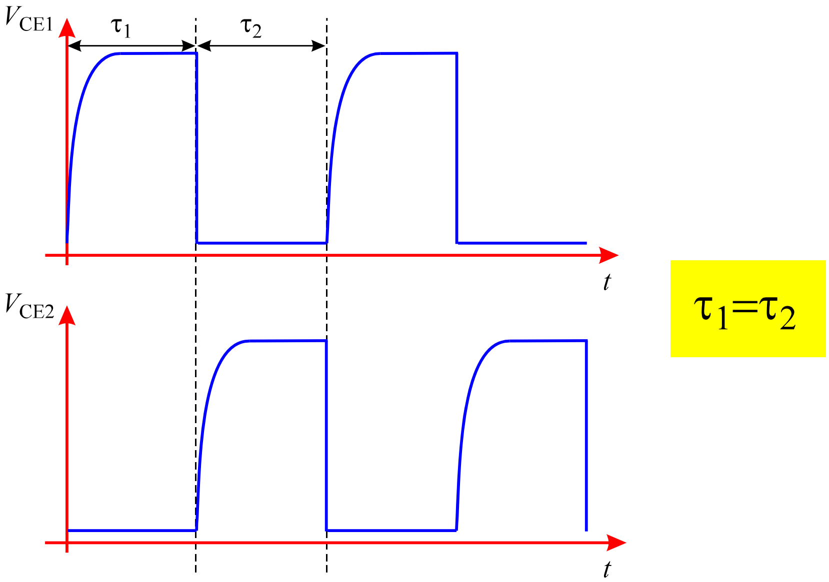


Fig.13 Evolução no tempo das tensões V_{CE1} e V_{CE2}, em um multivibrador astável tendo $R_{B1}C_1 = R_{B2}C_2$.

Se a condição expressa pela **Eq.(1)** não for satisfeita, os tempos de corte e de saturação se tornam distintos. A **Fig.14** ilustra as formas de onda geradas em um multivibrador exibindo $R_{B1}C_1 > R_{B2}C_2$.

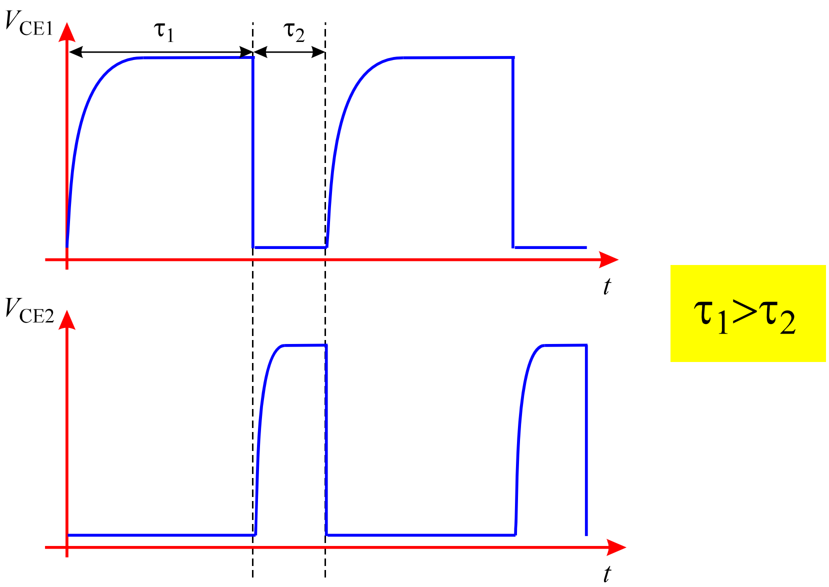


Fig.14 Evolução no tempo das tensões V_{CE1} e V_{CE2}, em um multivibrador astável tendo $R_{B1}C_1 > R_{B2}C_2$.

O tempo de corte de cada transistor pode ser calculado pelas expressões:

Transistor T_1:

$$\tau_1 = 0{,}69R_{B1}C_1 \tag{2}$$

Transistor T_2:

$$\tau_2 = 0{,}69 R_{B2} C_2 \qquad (3)$$

Como um ciclo da forma de onda corresponde a um período $T = \tau_1 + \tau_2$, a freqüência associada à forma de onda pode ser determinada pela expressão

$$f = \frac{1}{0{,}69\left(R_{B1}C_1 + R_{B2}C_2\right)} \qquad (4)$$

ou equivalentemente

$$f = \frac{1{,}45}{R_{B1}C_1 + R_{B2}C_2} \qquad (5)$$

Se os valores de resistência e capacitância estiverem expressos, respectivamente, em megaohms e microfarads, as **Eqs.(4)** ou **(5)** fornecem a freqüência em hertz.

Se o multivibrador obedecer à condição $R_{B1}C_1 = R_{B2}C_2$, a **Eq.(5)** pode ser simplificada para

$$f = \frac{0{,}725}{R_{B1}C_1} = \frac{0{,}725}{R_{B2}C_2} \qquad (6)$$

CORREÇÃO DA BORDA DE SUBIDA DOS PULSOS

A borda de subida da forma de onda referente a cada tensão coletor-emissor no circuito original do multivibrador astável é arredondada, porque corresponde ao processo de carga dos capacitores através dos resistores de coletor.

O tempo de subida da tensão coletor-emissor de cada transistor pode ser minimizado acrescentando um diodo e um resistor a cada malha de base do circuito, conforme mostrado na **Fig.15**.

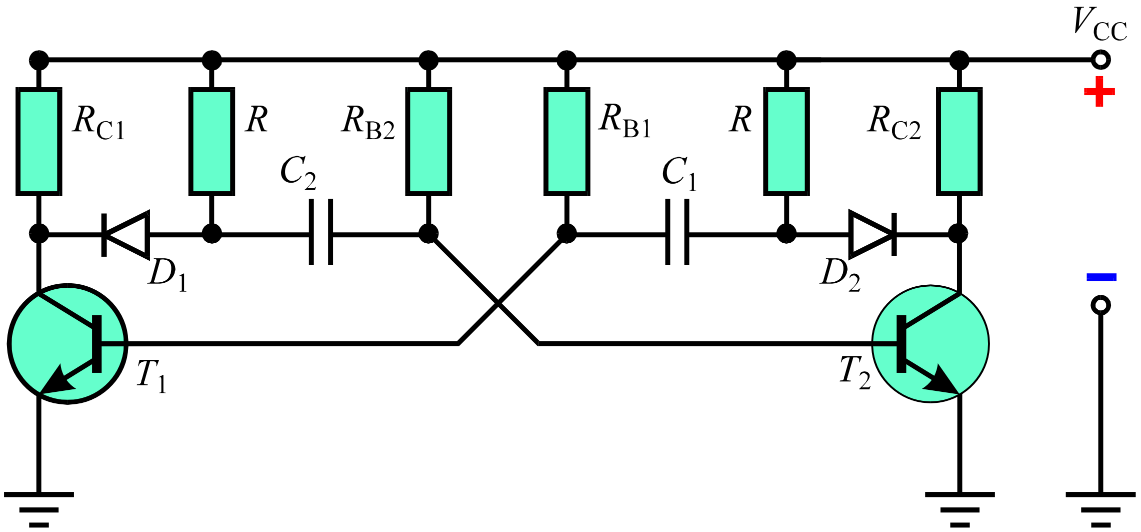


Fig.15 Multivibrador astável com a inclusão de diodos e resistores para minimização do tempo de subida das tensões coletor-emissor.

Com base na **Fig.15**, quando T_1, por exemplo, vai para o regime de corte, o potencial do cátodo torna-se superior ao potencial do ânodo de D_1. Sob essas condições, o diodo D_1 entra em bloqueio.

A **Fig.16** mostra a condição obtida logo após o corte de T_1, com D_1 e T_1 sendo representados por interruptores abertos.

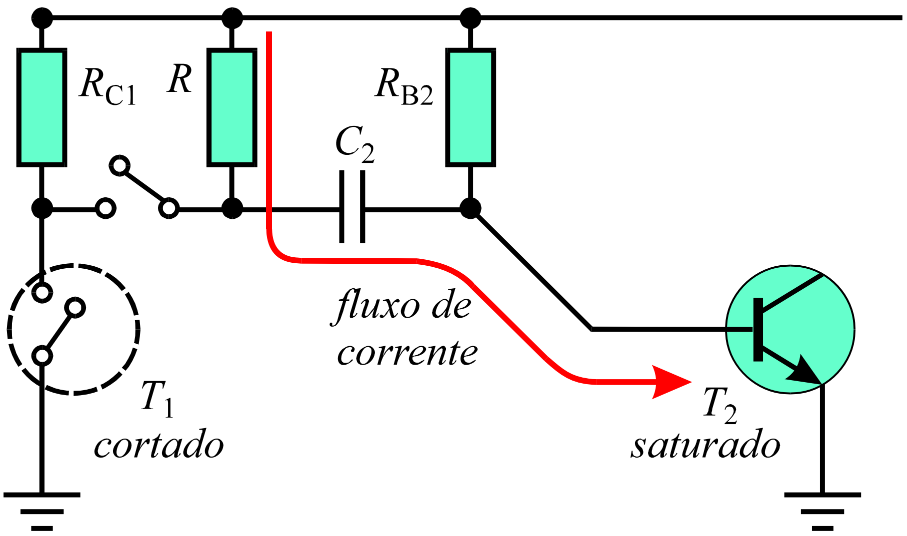


Fig.16 Circuito equivalente do multivibrador astável imediatamente após a entrada de T_1 no regime de corte.

Conforme ilustra a **Fig.16**, a corrente de carga de C_2 não circula mais através do resistor R_{C1}, mas sim através de R. Com isso, a tensão V_{CE1} aumenta para um valor próximo a V_{CC} assim que T_1 entra no regime de corte.

A **Fig.17** ilustra o aspecto qualitativo das formas de onda geradas nos coletores dos transistores a partir da inclusão dos diodos e resistores indicados na **Fig.16**.

A forma de onda quadrada, mostrada na **Fig.17**, é freqüentemente utilizada em circuitos digitais, onde recebe o nome de relógio ou *clock* do circuito.

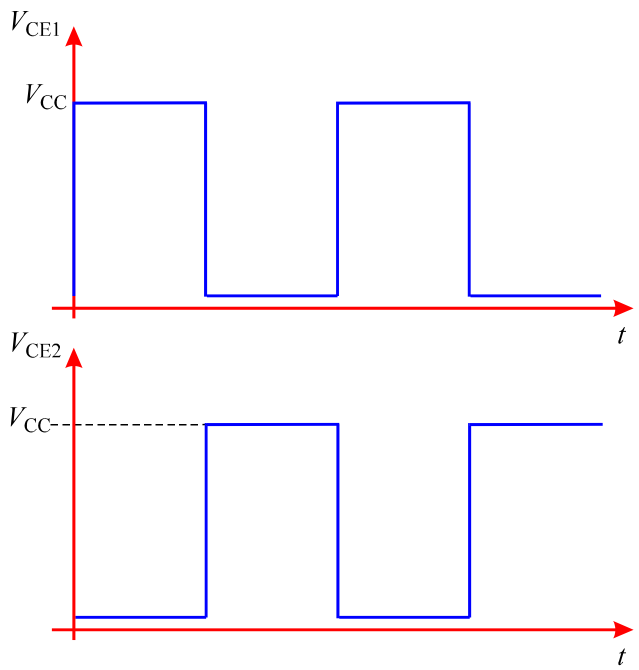


Fig.17 Formas de onda relativas às tensões coletor-emissor do multivibrador astável na configuração da **Fig.15**.

É comum, também, encontrar multivibradores astáveis com um resistor de emissor comum aos dois transistores, como ilustrado na **Fig.18**. O resistor é utilizado para propiciar uma transição mais rápida entre os estados de saturação e corte de cada transistor do circuito.

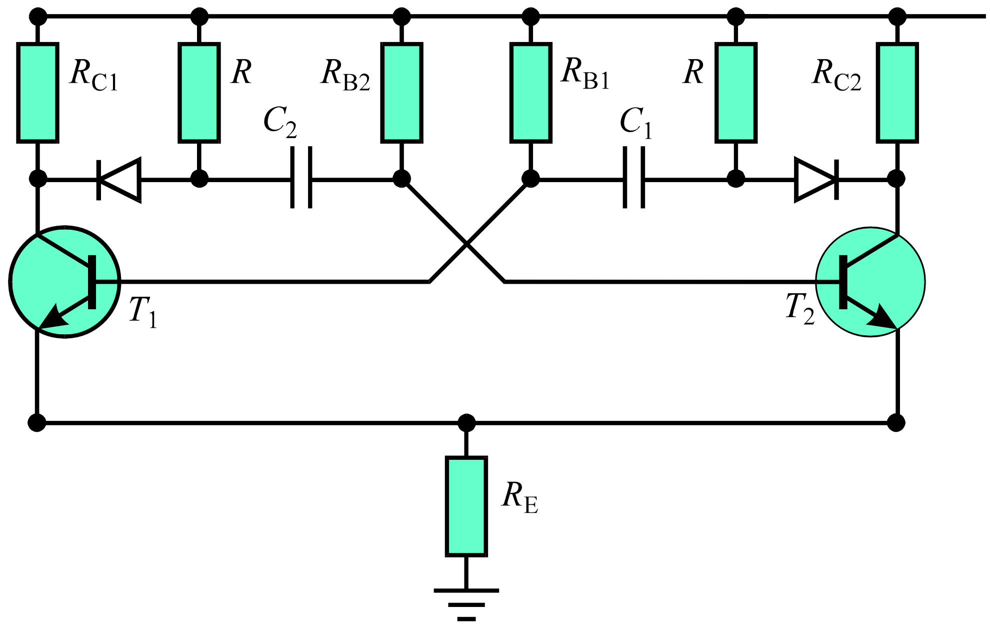


Fig.18 Configuração alternativa de um multivibrador astável, utilizada para obtenção de transições rápidas entre os estados do circuito.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Qual é a característica principal de um multivibrador astável?

2. Como devem ser dimensionados os resistores R_{B1}, R_{C1}, R_{B2} e R_{C2} de um multivibrador astável para que ele opere adequadamente?

3. Que condição deve ser satisfeita pelos elementos R_{B1}, R_{B2}, C_1 e C_2 de forma que um multivibrador astável gere uma seqüência de pulsos simétricos?

4. Cite uma aplicação do multivibrador astável em circuitos digitais.

BIBLIOGRAFIA

ARNOLD, Robert & BRANDT, Hans, Transistores, segunda parte, São Paulo, EPV (1975).

STRAUS, Leonard, Wave generation and shaping, São Paulo, 2ª edição, McGraw-Hill, Inc. (1970).

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Introdução

Existe um grande número de circuitos constituídos basicamente por um par de transistores e seus elementos polarizadores. Alguns desses circuitos, com larga aplicação, já foram apresentados, discutidos e estudados. É o caso dos multivibradores astável, biestável e monoestável.

Este fascículo trata de um circuito eletrônico denominado de **disparador Schmitt**, que também apresenta a configuração básica de um par de transistores. Esse circuito, simples na sua essência, é muito utilizado para a conversão de sinais analógicos variantes no tempo, em sinais digitais exibindo dois níveis distintos.

Os conceitos relacionados ao princípio de funcionamento do disparador Schmitt, juntamente com aqueles tratados no fascículo intitulado *Sensores*, desta Série de Eletrônica, permitirão ao leitor a utilização de circuitos de controle de iluminação, temporização e outros.

Para a boa compreensão do conteúdo e desenvolvimento das atividades contidas neste fascículo, o leitor deverá estar familiarizado com os conceitos relativos a:

- Multivibrador biestável.
- Multivibrador monoestável.
- Multivibrador astável.

O disparador Schmitt

O **disparador Schmitt** ou *Schmitt trigger*, como também é conhecido, é um tipo de circuito biestável largamente empregado nos circuitos eletrônicos digitais. Sua diferença básica em relação ao multivibrador convencional reside nas condições de disparo.

Se por um lado a troca de estados no circuito convencional requer uma **transição rápida** aplicada à entrada, como ilustrado na **Fig.1a**, a troca de estados no disparador Schmitt ocorre no momento em que **o sinal de entrada atinge um determinado nível, independentemente de sua forma de variação no tempo**, conforme ilustrado na **Fig.1b**.

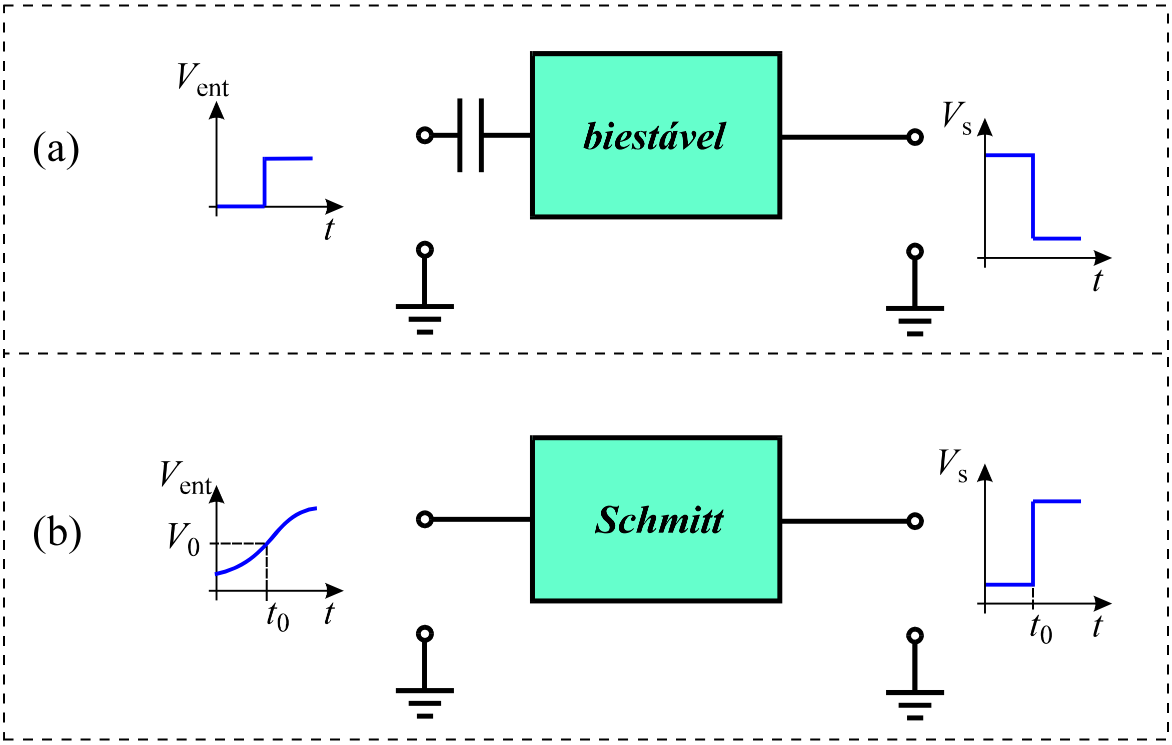


Fig.1 **(a)** Troca de estados em um multivibrador biestável convencional, a partir da aplicação de uma transição abrupta na entrada. **(b)** Troca de estados em um disparador Schmitt submetido a uma variação arbitrária de tensão na entrada.

Conforme mostra a **Fig.1b**, a saída do disparador Schmitt se mantém em um estado estável **até que a tensão de entrada atinja o valor limite** V_0 no instante de tempo $t = t_0$. Quando isso ocorre, a tensão de saída muda abruptamente de valor, o que corresponde à mudança de estado do disparador.

Esse tipo de característica, inerente ao disparador Schmitt, permite sua aplicação na conversão de um sinal analógico, que pode assumir qualquer nível de tensão ao longo do tempo, em um sinal digital de apenas dois níveis distintos.

Em diagramas de circuito, o disparador Schmitt é geralmente representado pelos blocos mostrados na **Fig.2**.

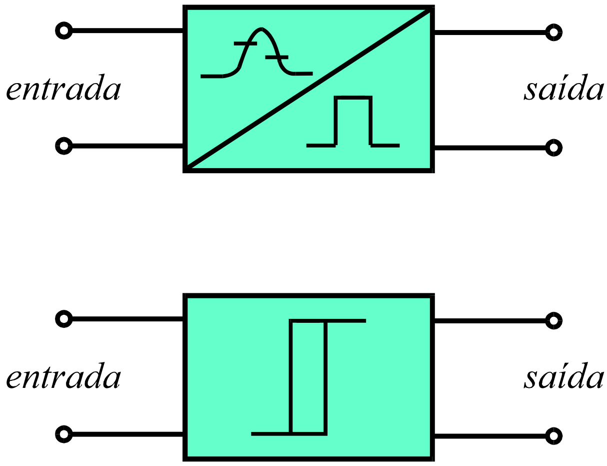


Fig.2 Duas formas de representação do disparador Schmitt.

A **Fig.3** mostra o circuito básico do disparador Schmitt, onde se pode notar que a diferença em relação ao multivibrador biestável convencional ocorre na ausência de realimentação do coletor de T_2 para a base de T_1.

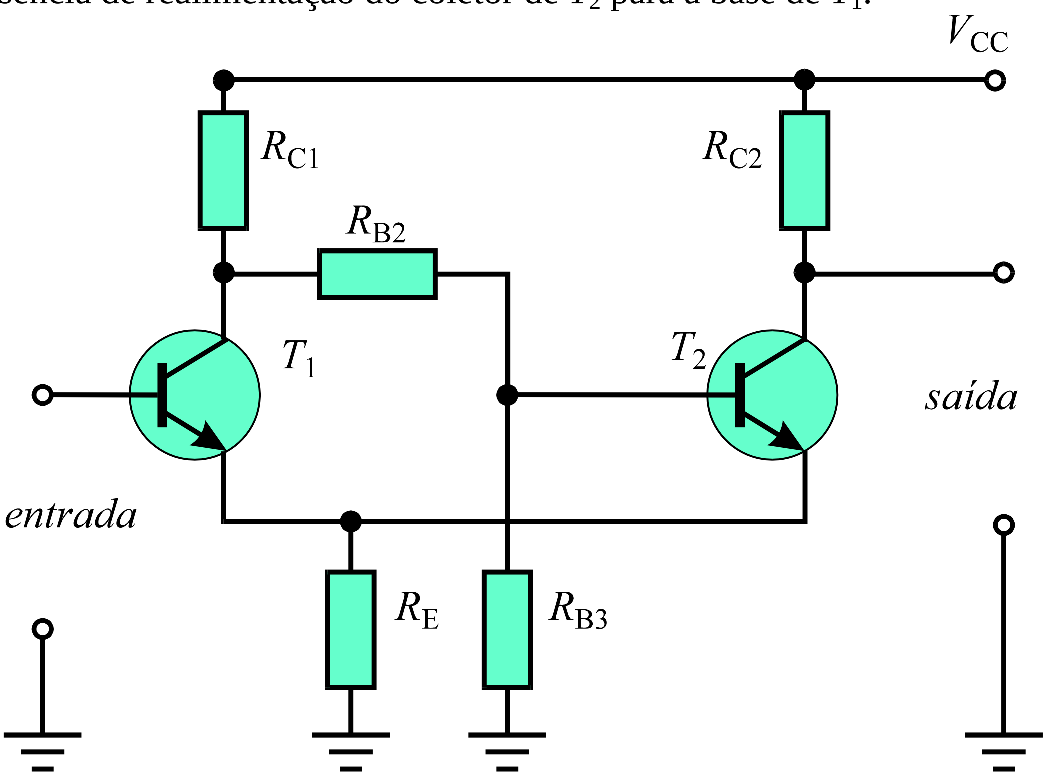


Fig.3 Circuito básico do disparador Schmitt.

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

CASO 1: SEM SINAL DE ENTRADA

O funcionamento do disparador Schmitt pode ser analisado considerando a entrada do circuito inicialmente desligada.

Com a base desligada, o transistor T_1 está no regime de corte. A **Fig.4a** ilustra essa condição, com T_1 sendo representado por um interruptor aberto. Isso equivale ao transistor T_1 estar ausente no circuito. Dessa forma T_2 fica polarizado por divisor de tensão, a partir da tensão V_{C1}, indicada na **Fig.4**.

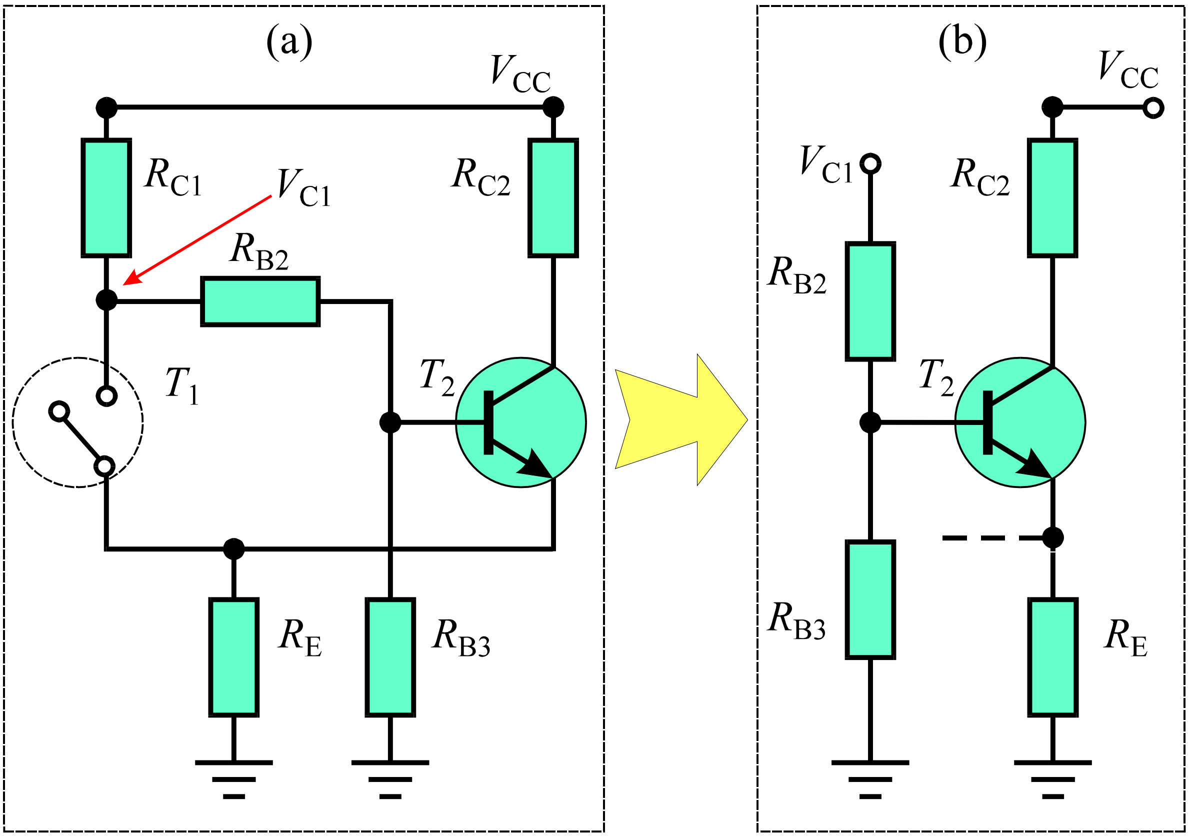


Fig.4 (a) Disparador Schmitt com T_1 no regime de corte. **(b)** Circuito equivalente.

No disparador Schmitt as resistências associadas a R_{B2} e R_{B3} são dimensionadas de forma que, com T_1 no regime de corte, a corrente de base em T_2 seja **muito maior que aquela necessária para sua saturação**.

Tomando como base um disparador Schmitt padrão, as tensões no circuito, medidas em relação ao terra do circuito, assumiriam os valores típicos indicados na **Fig.5**.

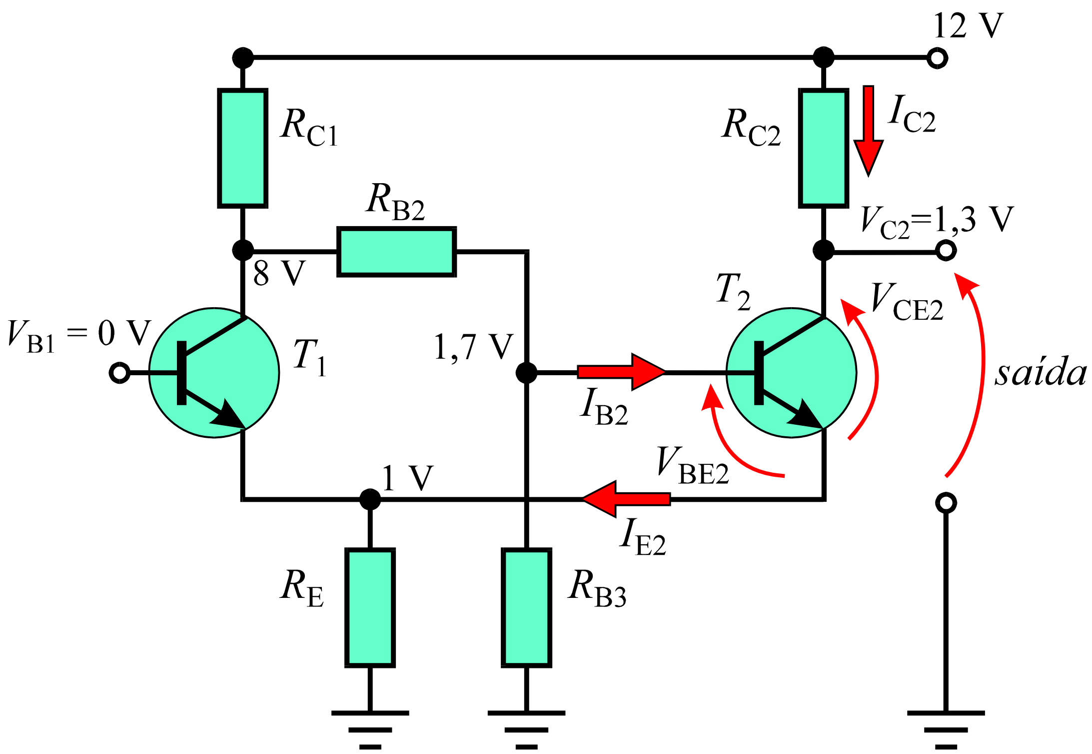


Fig.5 Valores típicos das tensões em alguns pontos do circuito de um disparador Schmitt convencional.

Com base na **Fig.5**, V_{BE2} = 0,7 V e V_{CE2} = 0,3V, o que implica a saturação de T_2. Enquanto persistir a condição V_{B1} = 0 V, a tensão de saída será mantida no valor V_{C2} = 1,3V.

A **Fig.6** ilustra a dependência temporal da tensão de saída para V_{B1} = 0 V.

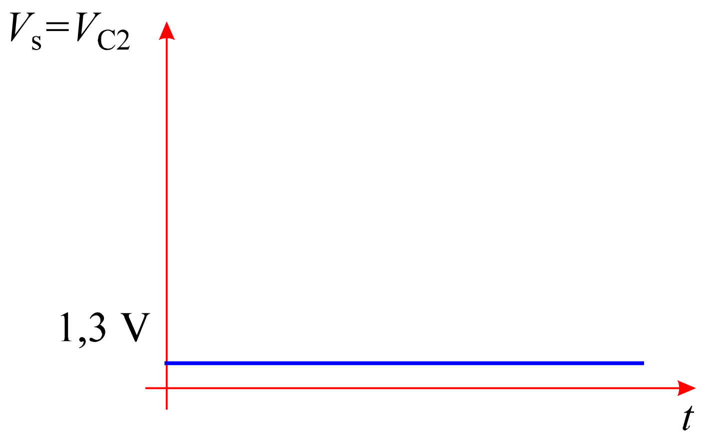


Fig.6 Dependência temporal da tensão de saída na condição $V_{ent} = V_{B1}$ = 0 V.

Na condição de saturação de T_2, a corrente I_{E2}, indicada na **Fig.5**, pode ser determinada pela expressão

$$I_{E2} = \frac{V_{CC} - V_{CE,sat}}{R_{C2} + R_E} \qquad (1)$$

onde $V_{CE,sat}$ = 0,3V para transistores de silício.

CASO 2: COM SINAL DE ENTRADA

O estado do circuito mostrado na **Fig.5** é estável e só pode ser alterado pela aplicação de um determinado valor de tensão na base de T_1. Esse valor de tensão pode ser obtido, por exemplo, com o emprego de um potenciômetro conectado à base de T_1, conforme ilustrado na **Fig.7**.

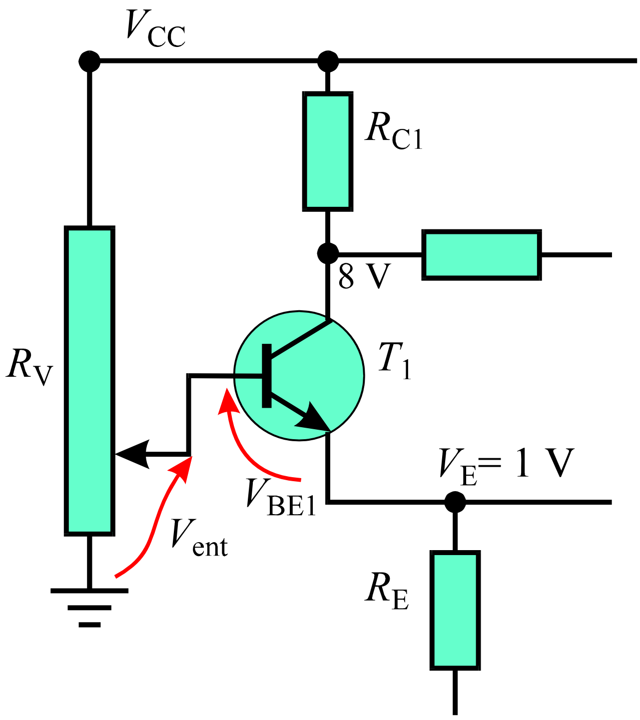


Fig.7 Emprego de um potenciômetro para se obter uma variação de tensão na base do transistor T_1.

Se a tensão V_{ent}, derivada do potenciômetro da **Fig.7** satisfaz à condição

$$V_{ent} < 1{,}5\ \text{V}$$

obtém-se uma tensão base-emissor no transistor T_1 satisfazendo à condição

$$V_{BE1} = V_{ent} - V_E < 1{,}5\ \text{V} - 1\ \text{V} \quad \Rightarrow \quad V_{BE1} < 0{,}5\ \text{V}$$

A condição V_{BE1} < 0,5 V mantém o transistor T_1 no regime de corte, e conseqüentemente, o circuito permanece estável com T_2 saturado, e com uma tensão de saída $V_{C2} = V_s$ = 1,3 V. Ou seja:

$$V_{ent} < 1{,}5\ \text{V} \Rightarrow V_{BE1} < 0{,}5\ \text{V} \Rightarrow V_{C2} = V_s = 1{,}3\ \text{V}$$

No momento em que a tensão de entrada atinge o valor V_{ent} = 1,5 V, tem-se que $V_{BE1} = V_\gamma$ = 0,5 V. O parâmetro V_γ = 0,5 V se refere ao valor limite da tensão base-emissor de um transistor de silício que o coloca na iminência de condução. Um exame da **Fig.8** indica que, a iminência de condução de T_1 produz dois efeitos:

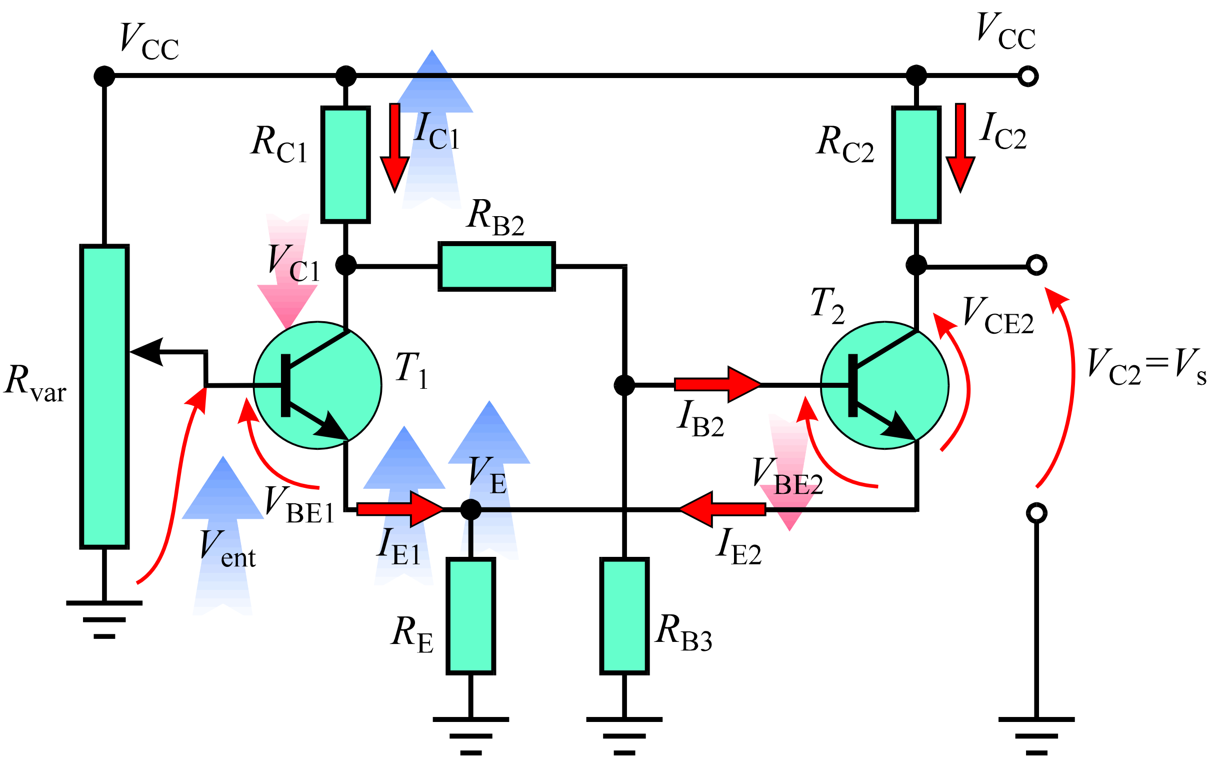


Fig.8 Efeitos produzidos no circuito da **Fig.7** na iminência de condução de T_1.

- A corrente no resistor R_E aumenta devido ao aumento da corrente I_{E1} proveniente de emissor de T_1. Ocorre, portanto, um pequeno aumento na tensão V_E indicada na **Fig.8**.

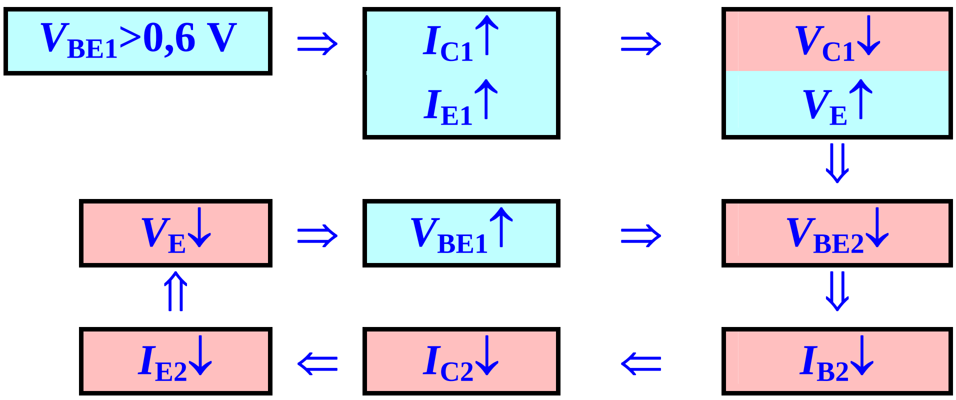
- Aumenta a corrente de coletor I_{C1} o que provoca um acréscimo na tensão sobre o resistor R_{C1}. Dado que $V_{C1}=V_{CC} - R_{C1}I_{C1}$, a tensão V_{C1} diminui.

Uma vez que o regime de operação de T_2 é determinado pelas tensões V_E e V_{C1}, à medida que V_E aumenta, V_{C1} diminui, o que provoca um decréscimo na

tensão V_{BE2}, conforme ilustrado na **Fig.8**. O transistor T_2 permanecerá saturado enquanto a corrente de base I_{B2} for superior ao valor de saturação.

Com base na **Fig.8**, quando a tensão de entrada atingir um valor tal que T_1 conduza mais fortemente, o que ocorre para $V_{BE1} \cong 0{,}6$ V, a tensão V_{C1} começa a diminuir rapidamente, provocando um rápido decréscimo na corrente I_{B2}, o que a torna insuficiente para manter T_2 saturado. Isso faz que T_2 comece a sair da saturação em direção ao regime de corte, o que provoca uma rápida diminuição na corrente I_{E2} e conseqüentemente na tensão V_E. Com a redução na tensão V_E, aumenta o valor de V_{BE1} o que coloca T_1 ainda mais no regime de condução.

Essa seqüência de eventos leva rapidamente T_2 ao regime de corte e T_1 à saturação, conforme ilustrado no diagrama seguinte.



O ciclo de realimentação indicado no diagrama anterior prossegue até que T_1 esteja plenamente saturado, com $V_{BE1} \approx 0{,}7$ V e T_2, no regime de corte com $V_{CE2} \approx 0{,}3$ V.

Dessa forma, o circuito se mantém estável mesmo que a tensão de entrada continue aumentando, conforme ilustrado na **Fig.9**.

Antes de prosseguir na análise, é necessário observar um aspecto importante na escolha dos elementos de polarização dos dois transistores do disparador Schmitt, mostrado na **Fig.10**.

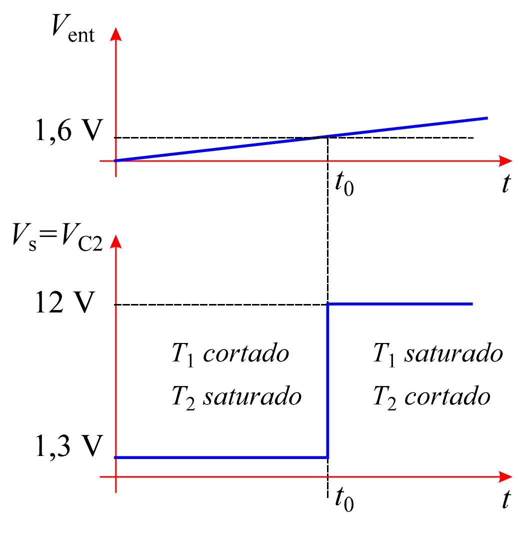


Fig.9 Tensões de entrada e saída no circuito da **Fig.8**.

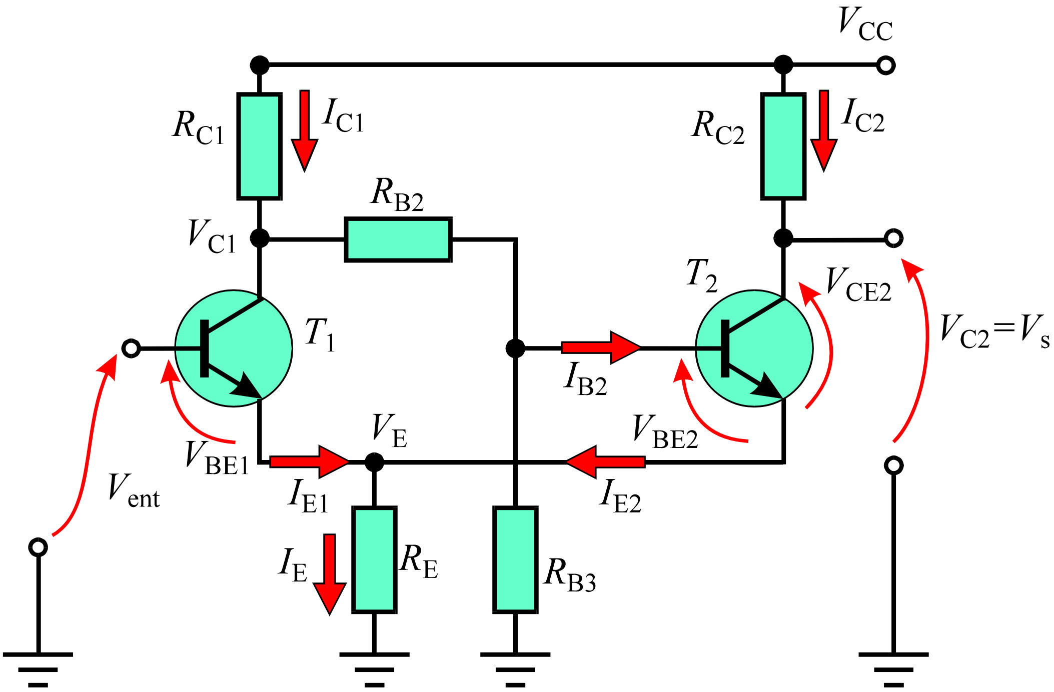


Fig.10 Circuito do disparador Schmitt.

Em geral, a resistência do resistor R_{C1} é 4 a 5 vezes maior que aquela do resistor R_{C2}. Dessa forma, nos dois estados possíveis do circuito, tem-se que:

T_1 saturado e T_2 no regime de corte

Denotando-se a corrente e a tensão no resistor R_E por I_{E12} e V_{E12}, respectivamente, da **Fig.10** tem-se que:

$$I_{C1} \approx I_{E1} = \frac{V_{CC} - V_{CE,sat}}{R_{C1} + R_E}$$

$$I_{E2} \approx 0$$

$$\Rightarrow I_E \equiv I_{E12} = I_{E1} + I_{E2} \approx \frac{V_{CC} - V_{CE,sat}}{R_{C1} + R_E}$$

$$\boxed{\Rightarrow V_E \equiv V_{E12} = R_E I_{E12} = R_E \left(\frac{V_{CC} - V_{CE,sat}}{R_{C1} + R_E} \right)}$$

T_2 saturado e T_1 no regime de corte

Denotando-se a corrente e a tensão no resistor R_E por I_{E21} e V_{E21}, respectivamente, da **Fig.10** tem-se que:

$$I_{C2} \approx I_{E2} = \frac{V_{CC} - V_{CE,sat}}{R_{C2} + R_E}$$

$$I_{E1} \approx 0$$

$$\Rightarrow I_E \equiv I_{E21} = I_{E1} + I_{E2} \approx \frac{V_{CC} - V_{CE,sat}}{R_{C2} + R_E}$$

$$\boxed{\Rightarrow V_E \equiv V_{E21} = R_E I_{E21} = R_E \left(\frac{V_{CC} - V_{CE,sat}}{R_{C2} + R_E} \right)}$$

Os dois resultados obtidos anteriormente implicam a seguinte conclusão:

$$\boxed{R_{C1} > R_{C2}}$$

$$\Downarrow$$

$$\boxed{R_E \left(\frac{V_{CC} - V_{CE,sat}}{R_{C1} + R_E} \right) < R_E \left(\frac{V_{CC} - V_{CE,sat}}{R_{C2} + R_E} \right)}$$

$$\Downarrow$$

$$\boxed{V_{E12} < V_{E21}}$$

Assim, para $R_{C1} > R_{C2}$, a queda de tensão no resistor R_E assume seu menor valor com T_1 saturado e T_2 no regime de corte.

A **Fig.11** mostra um exemplo de valores de tensão que poderiam estar presentes em alguns pontos do disparador Schmitt no estado correspondente a T_1 saturado e T_2 no regime de corte. Nesse exemplo, V_E = 0,3 V, o que corresponde a um valor cerca de 3 vezes inferior àquele indicado na **Fig.5**.

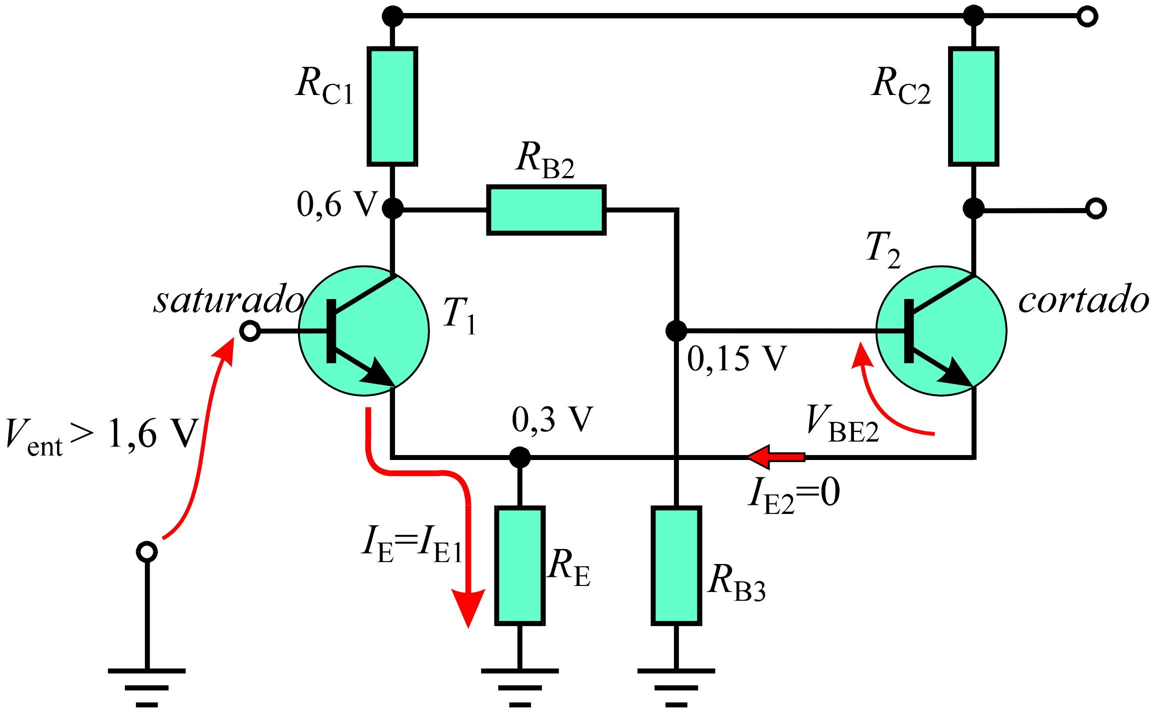


Fig.11 Exemplo de valores típicos de tensão em pontos do circuito da **Fig.10** após a transição de T_1 do corte à saturação.

Para que o circuito volte ao estado inicial, com T_2 saturado, é necessário que a tensão de entrada diminua o suficiente para levar o transistor T_1 ao regime de corte. Isso implica a obtenção de uma tensão $V_{BE1} < 0,5$ V. Com base nos valores indicados na **Fig.11**

$$V_{ent} = V_{BE1} + V_E \quad \Rightarrow \quad V_{BE1} = V_{ent} - V_E = V_{ent} - 0{,}3\text{ V}$$

de modo que

$$V_{BE1} < 0{,}5\text{ V} \;\Rightarrow V_{ent} - 0{,}3\text{ V} < 0{,}5\text{ V}$$

$$\boxed{\Rightarrow V_{ent} < 0{,}8\text{ V}}$$

Dessa forma, a partir do instante de tempo em que a tensão de entrada se torna inferior a 0,8 V, o transistor T_1 entra rapidamente no regime de corte, o que provoca a saturação de T_2. A **Fig.12** ilustra o tipo de sinal obtido na saída do disparador Schmitt, para variações lineares da tensão de entrada como função do tempo.

CURVA DE TRANSFERÊNCIA

A **Fig.13** mostra a **curva de transferência** do circuito, que representa a dependência da tensão de saída com relação à tensão de entrada. A seta para cima por sobre a linha tracejada indica que um aumento na tensão V_{ent} além do valor limite de 1,6 V provoca a transição de estados, que corresponde a uma mudança brusca na tensão de saída de 1,3 V para 12 V. A seta para baixo indica que uma redução na tensão V_{ent} abaixo do valor limite de 0,8 V provoca a segunda transição de estados, que corresponde a uma mudança brusca na tensão de saída de 12 V para 1,3 V.

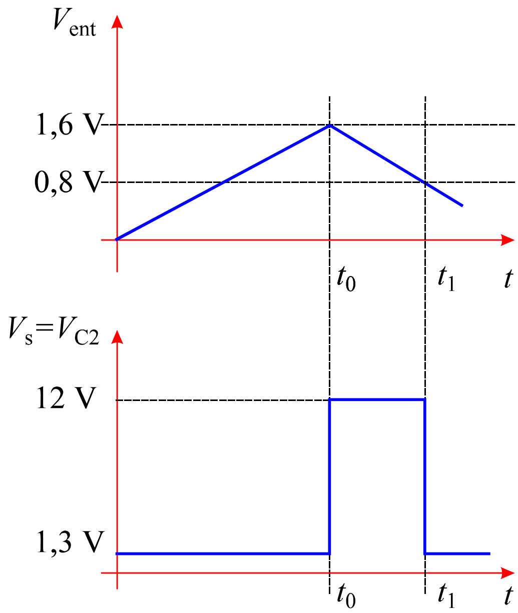


Fig.12 Sinal de saída do disparador Schmitt, para variações lineares no tempo da tensão de entrada.

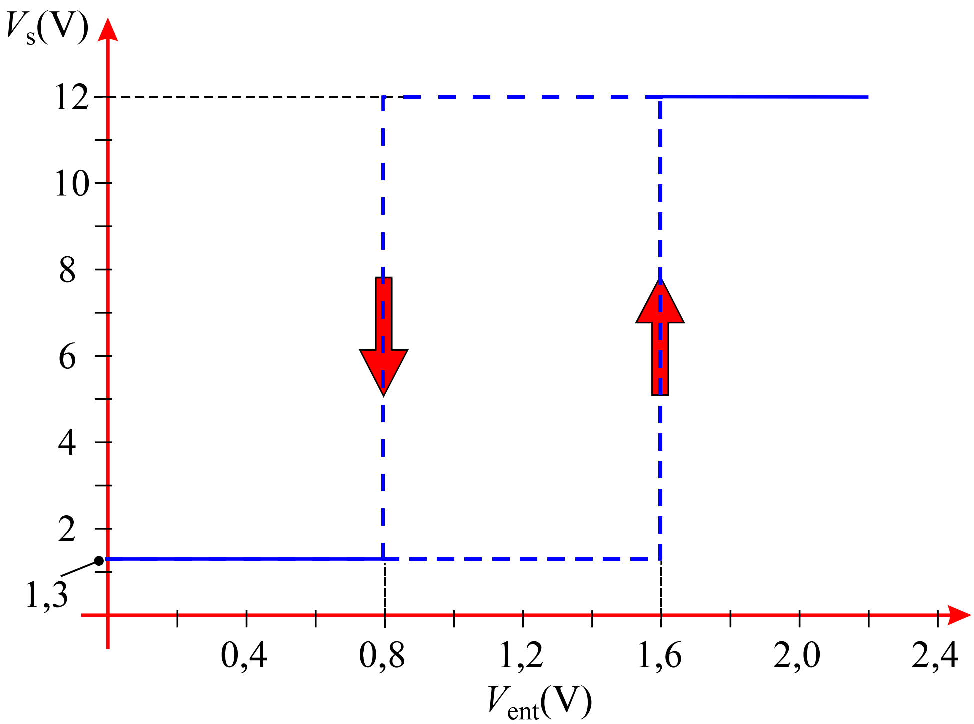


Fig.13 Curva de transferência de um disparador Schmitt.

Existe uma peculiaridade na curva de transferência mostrada na **Fig.13**, uma vez que o simples conhecimento do nível de tensão na entrada não é suficiente para determinar o valor da tensão de saída.

Por exemplo, para a tensão de entrada de 1,2V indicada na **Fig.14**, a saída poderia ser 1,3 ou 12 V. Se fosse conhecido, por exemplo, que a tensão de entrada foi variada de um valor inicial de 0,7 V até o valor de 1,2 V, poder-se-ia afirmar, com segurança, que a tensão de saída no circuito seria de 1,3 V. Se por outro lado, fosse já conhecido que a tensão de entrada estivesse diminuindo de um valor de 2 V, até atingir o valor de 1,2 V, a resposta com certeza seria uma tensão de saída de 12 V.

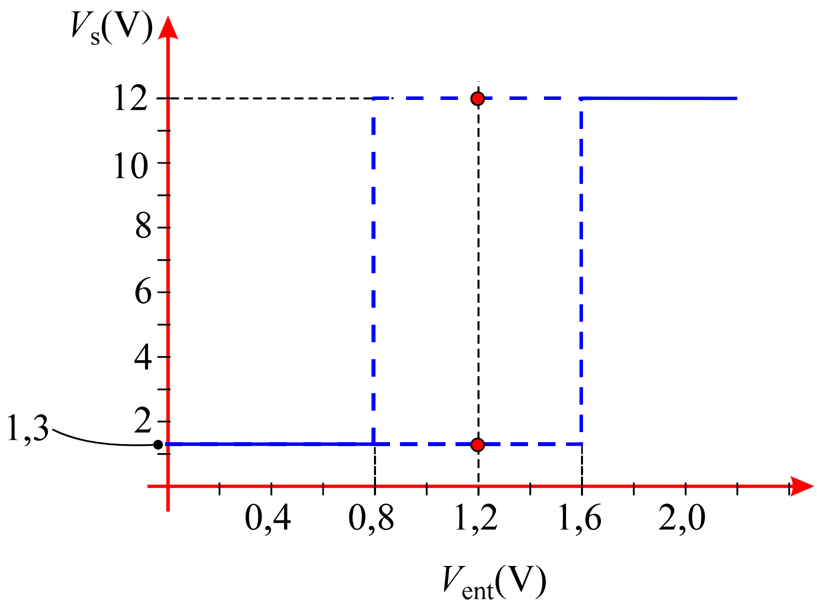


Fig.14 Incerteza na determinação da tensão de saída do disparador Schmitt, para uma tensão de entrada de 1,2 V.

Esse exemplo serve para demonstrar que o disparador Schmitt tem **memória**, ou seja, o tipo de resposta do sistema depende da **história passada do sinal de entrada**.

Pode-se, portanto, dividir a característica de transferência mostrada na **Fig.14**, em três regiões:

- $V_{ent} > 1,6$ V $\Rightarrow V_s = 12$ V;
- $V_{ent} < 0,8$ V $\Rightarrow V_s = 1,3$ V;
- 0,8 V $< V_{ent} <$ 1,6 V $\Rightarrow V_s$ poderá assumir dois valores, cuja determinação só poderá ser feita, conhecendo-se a história passada do sinal de entrada.

Quando mais de um nível de entrada provoca troca de estados em um sistema, conforme evidenciado na característica de transferência do disparador Schmitt, diz-se que o sistema exibe **histerese.**

ALTERAÇÃO DO CICLO DE HISTERESE NO DISPARADOR SCHMITT

Em muitas ocasiões a existência de histerese em um sistema pode ser indesejável, tornando-se necessário reduzi-la ao máximo.

Uma das formas de reduzir a histerese no disparador Schmitt é alterando o ganho do circuito através do resistor de coletor de T_1. Entretanto, esse procedimento pode tornar o circuito instável.

Uma outra possibilidade consiste em acrescentar um resistor em série com o emissor de apenas um dos transistores. A **Fig.15** mostra uma possível configuração do disparador Schmitt, tendo um resistor em série com o emissor de T_1.

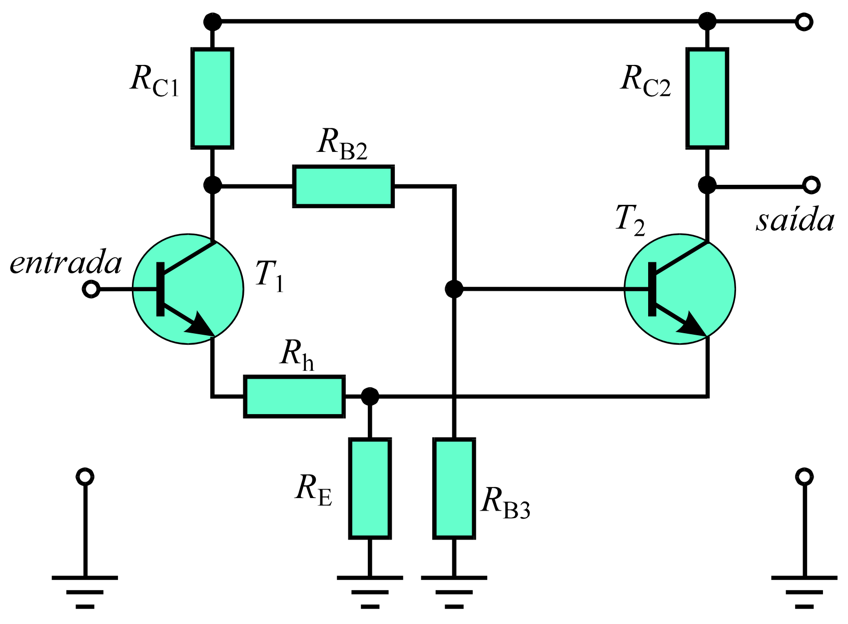


Fig.15 Configuração alternativa do disparador Schmitt para redução da histerese do circuito.

Na forma indicada na **Fig.15**, o resistor adicional não altera o comportamento de T_2. Permanece assim inalterado o valor V_1 da tensão de entrada que promove a transição de T_2 da saturação ao corte.

Já o nível de tensão V_2 que promove a transição de T_1 da saturação ao corte torna-se maior com o acréscimo do resistor, resultando em uma redução da histerese.

A **Fig.16** ilustra a alteração na histerese de um disparador Schmitt, resultante da adição de um resistor em série com o emissor de T_1.

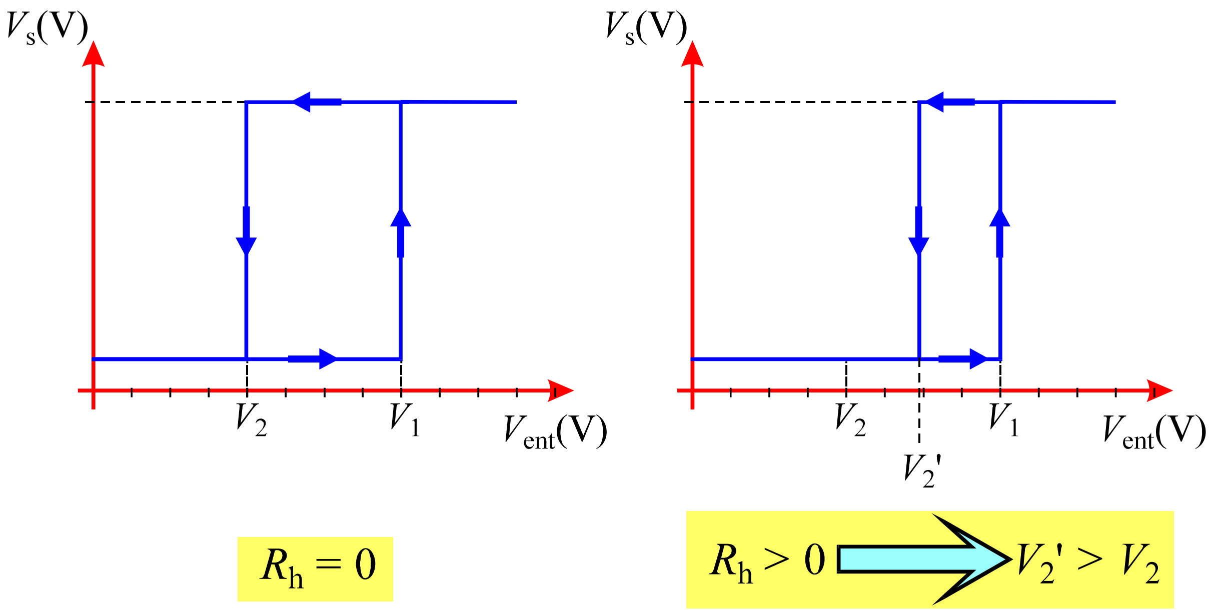


Fig.16 Alteração da histerese de um disparador Schmitt a partir da modificação indicada na **Fig.15**.

Pode-se também diminuir o efeito da histerese pela adição de um resistor em série com o emissor de T_2, conforme indicado na **Fig.17**.

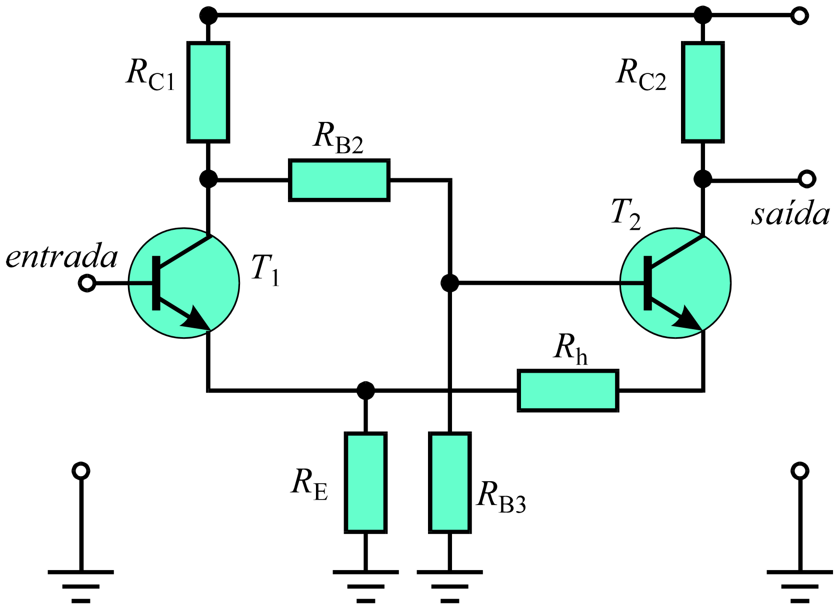


Fig.17 Disparador Schmitt com a adição de um resistor em série com o emissor de T_2 para redução da histerese.

Nessa situação V_2 permanece inalterada, ao passo que V_1 diminui, conforme mostrado na **Fig.18**.

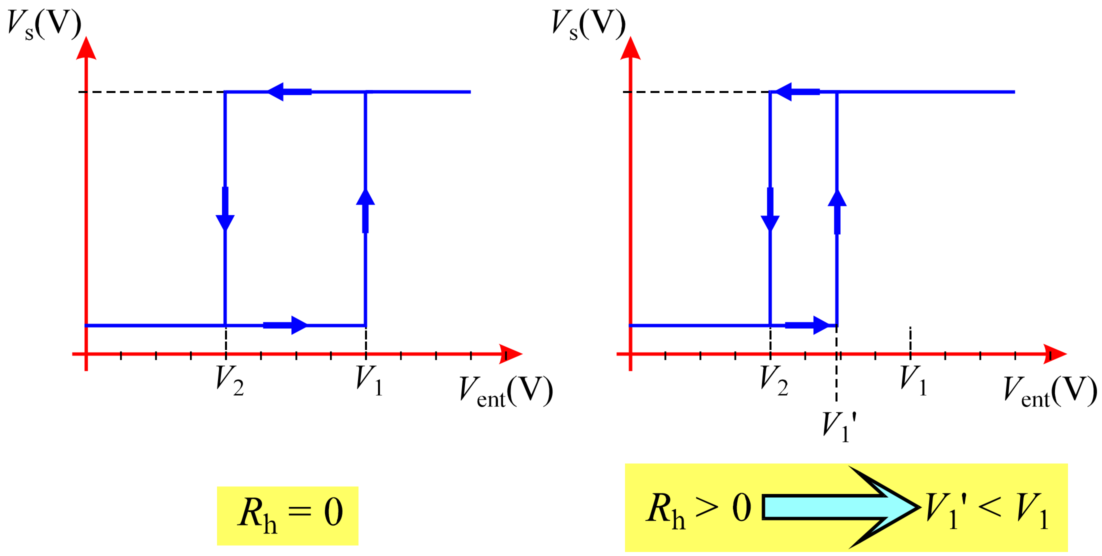


Fig.18 Alteração da histerese de um disparador Schmitt a partir da modificação indicada na **Fig.17**.

O valor de resistência R_h do resistor série adicionado ao circuito, pode ser determinado aproximadamente a partir da expressão,

$$R_h = \frac{\Delta V_{original} - \Delta V_{desejado}}{I_E} \qquad (2)$$

onde:

- $\Delta V_{original}$ é a largura da histerese, obtida da característica de transferência do circuito original.
- $\Delta V_{desejado}$ é o valor desejado da largura da histerese.
- I_E é a corrente de emissor associada ao transistor cujo emissor é conectado ao resistor R_h.

Exemplo 1: Determinar o valor da resistência R_h de forma a alterar a histerese de um disparador Schmitt, de acordo com as informações contidas na **Tabela 1**.

Tabela 1 Dados referentes ao **Exemplo 1**.

Parâmetro	**Circuito original**	**Circuito com resistor R_h**
V_1	2,5 V	2,5 V
V_2	1,8 V	2,3 V
I_E	3 mA	

De acordo com os dados da **Tabela 1**, V_1 permanece inalterado, e conseqüentemente R_h deve ser adicionado em série com o emissor de T_1. A corrente I_E indicada na **Tabela 1** corresponde, portanto, à corrente de emissor de T_1. Com esses dados, tem-se que:

$$\Delta V_{original} = 2{,}5 - 1{,}8 = 0{,}7 \text{ V}$$
$$\Delta V_{desejado} = 2{,}5 - 2{,}3 = 0{,}2 \text{ V}$$

e utilizando a **Eq.(2)**, obtém-se

$$R_h = \frac{0{,}7 - 0{,}2}{0{,}003} = \frac{0{,}5}{0{,}003} = 166\,\Omega$$

É virtualmente impossível eliminar completamente a histerese, devendo-se, no máximo, procurar a melhor solução possível. Se os valores desejados fossem $V_1 = V_2$=2,5 V, o valor da resistência R_h seria

$$R_h = \frac{0{,}7 - 0}{0{,}003} = \frac{0{,}7}{0{,}003} = 233\,\Omega$$

Neste último caso, o arredondamento no valor de R_h deve ser realizado para menos, de forma a garantir uma histerese mínima e evitar instabilidades no circuito.

APLICAÇÕES DO DISPARADOR SCHMITT

O disparador Schmitt é utilizado principalmente na conversão de sinais analógicos em digitais. Considere-se, por exemplo, um disparador Schmitt exibindo a curva de transferência mostrada na **Fig.19**.

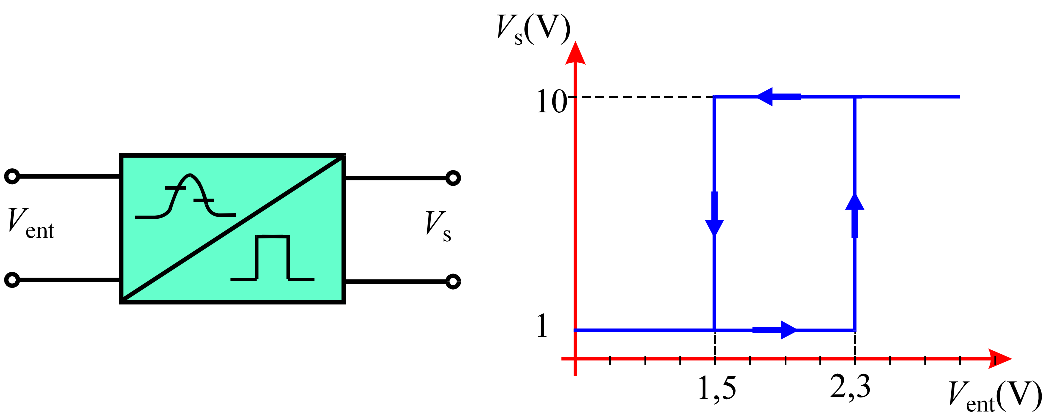


Fig.19 Disparador Schmitt e sua curva de transferência.

Se fosse aplicada na entrada do disparador uma tensão *ca* com $V_{máx}$ = 3 V, com base na curva de transferência mostrada na **Fig.19**, a saída do disparador forneceria uma seqüência de pulsos retangulares, conforme indicado na **Fig.20**. Verifica-se que para $V_{ent} \geq 2{,}3$ V, é gerado um pulso de 10 V na saída. Quando a entrada é inferior a 1,5 V a saída se mantém em 1 V. Como se pode observar na **Fig.20** o trem de pulsos tem a mesma freqüência do sinal de entrada.

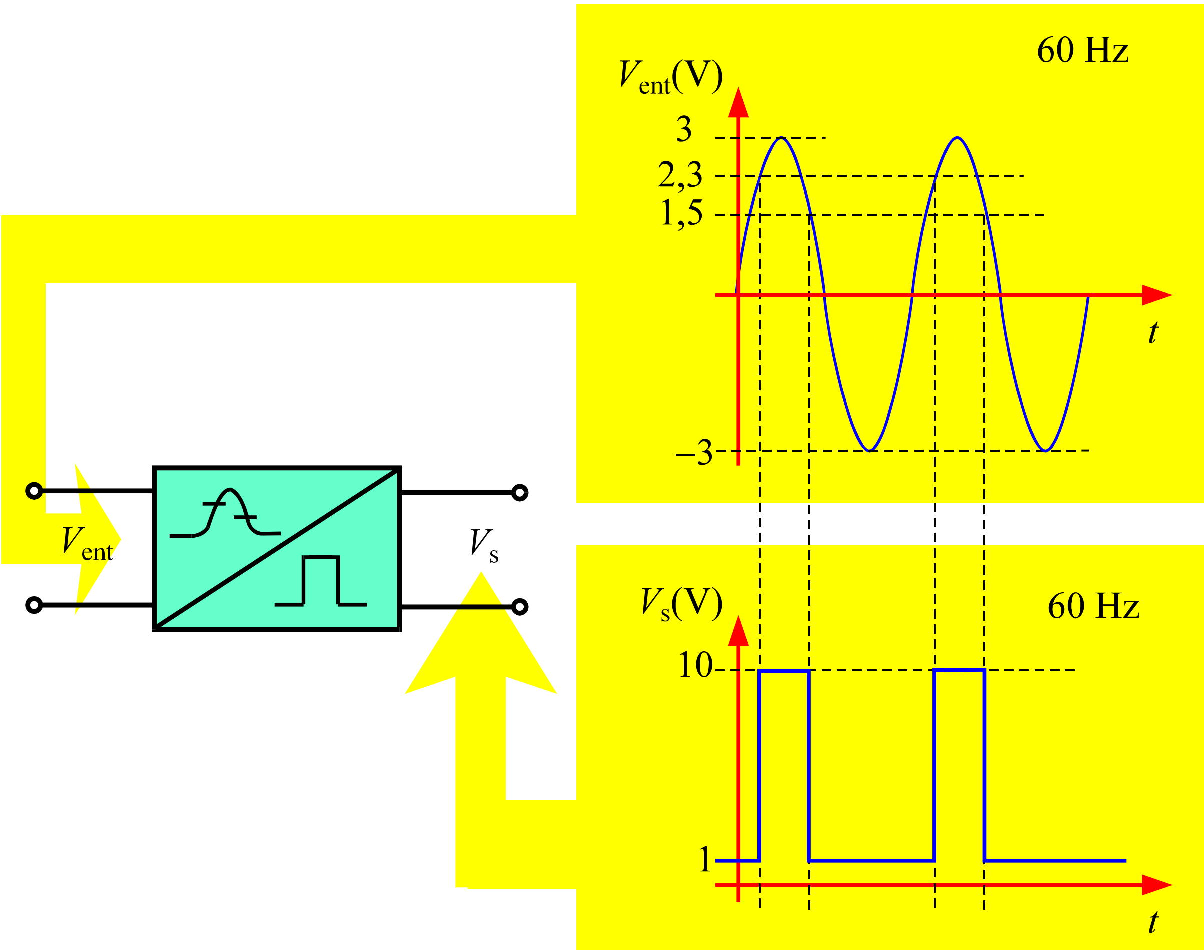


Fig.20 Sinal gerado na saída do disparador Schmitt da **Fig.19**, para um sinal senoidal aplicado à entrada.

Para proteger a entrada do circuito quando a tensão de entrada se torna negativa, pode-se utilizar um retificador de meia onda na entrada do disparador, conforme ilustrado na **Fig.21**.

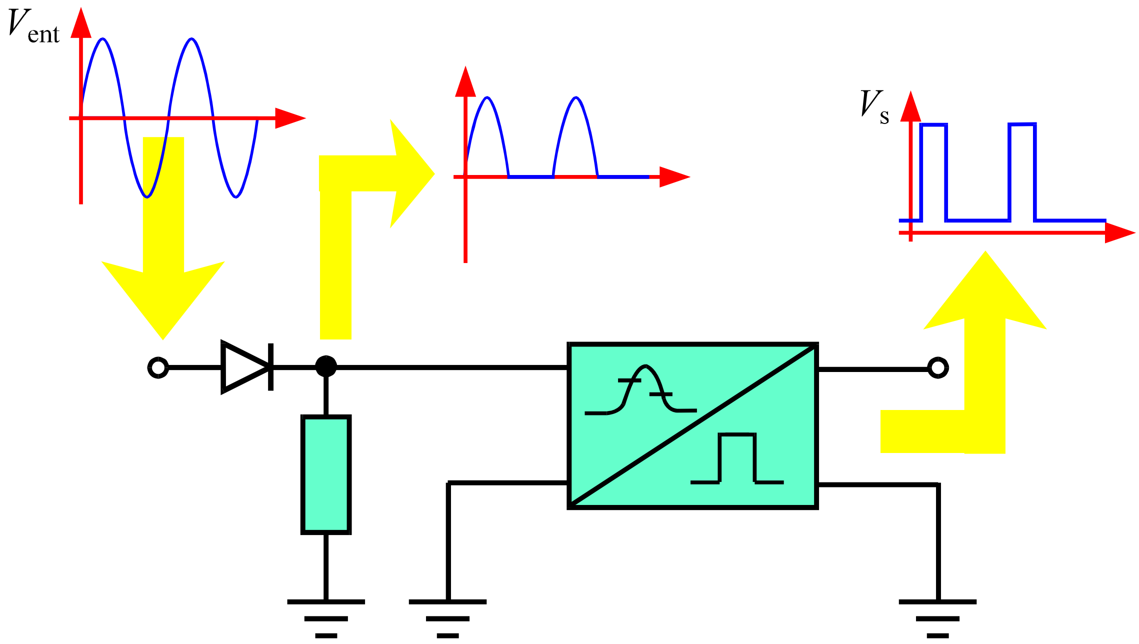


Fig.21 Uso de um retificador de meia onda para proteção do disparador Schmitt.

O circuito mostrado na **Fig.21** é muito utilizado para servir como gerador de pulsos para relógios eletrônicos, que utilizam a rede elétrica de 60 Hz. O mesmo circuito pode ser utilizado para disparar em valores mais altos da tensão de entrada utilizando um divisor de tensão, na forma indicada na **Fig.22**.

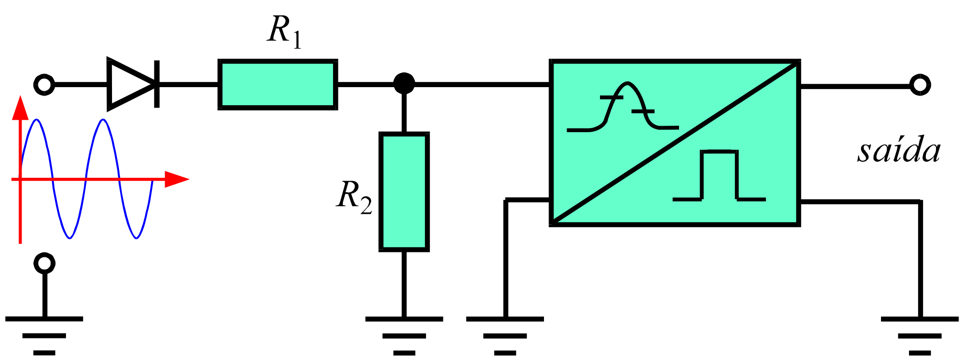


Fig.22 Circuito da **Fig.21** com a adição de um divisor de tensão para permitir o disparo do circuito em níveis mais altos da tensão de entrada.

A adição dos resistores do divisor de tensão da **Fig.22** não altera as tensões de disparo V_1 e V_2. No entanto, os níveis de tensão de entrada para provocar os disparos dependem da relação entre R_2 e R_1.

O disparador Schmitt pode também ser utilizado no acionamento de relés, largamente empregados no controle de cargas de alta potência. A **Fig.23** mostra um disparador Schmitt com um relé substituindo o resistor de coletor de T_2.

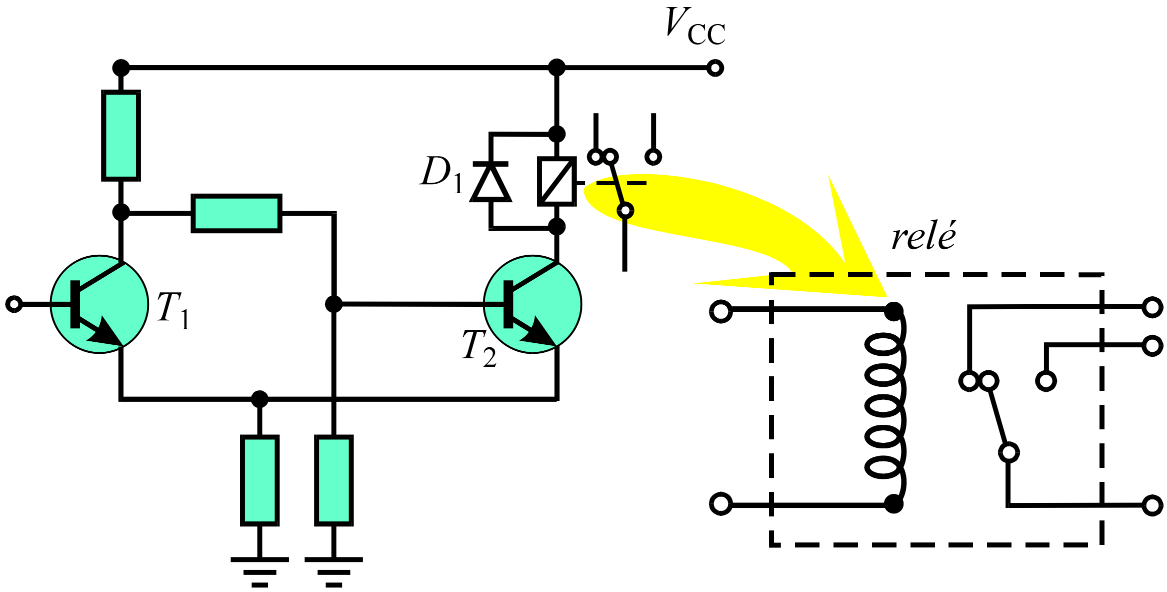


Fig.23 Disparador Schmitt utilizado para o acionamento de um relé.

No circuito da **Fig.23**, enquanto T_2 está saturado a corrente I_{C2} circula através da bobina do relé que fica acionado. Aplicando um determinado valor de tensão de entrada, T_1 satura e T_2 entra no regime de corte. A corrente I_{C2} torna-se praticamente nula, desativando o relé.

A vantagem no uso do relé reside no fato de seus contatos estarem isolados eletricamente da bobina, conforme ilustrado na **Fig.23**. Isso possibilita que o relé seja acionado por um circuito eletrônico em *cc* e controle cargas em *ca*.

A **Fig.24** mostra um disparador Schmitt utilizado para controlar uma lâmpada incandescente e os gráficos de comportamento da tensão V_{C2} em função das variações da tensão de entrada.

Um aspecto importante a se observar nos circuitos das **Figs.23** e **24** é a presença do diodo em paralelo com a bobina do relé. Esse diodo é utilizado para proteger o transistor das sobretensões geradas, por auto-indução, toda vez que a bobina do relé é desenergizada. O diodo, que normalmente está polarizado inversamente, conduz apenas quando a auto-indução dá origem a uma força contra-eletromotriz na bobina, impedindo que o transistor seja danificado.

Toda vez que um indutor for operado em chaveamento por um transistor é mandatório o uso do diodo de proteção.

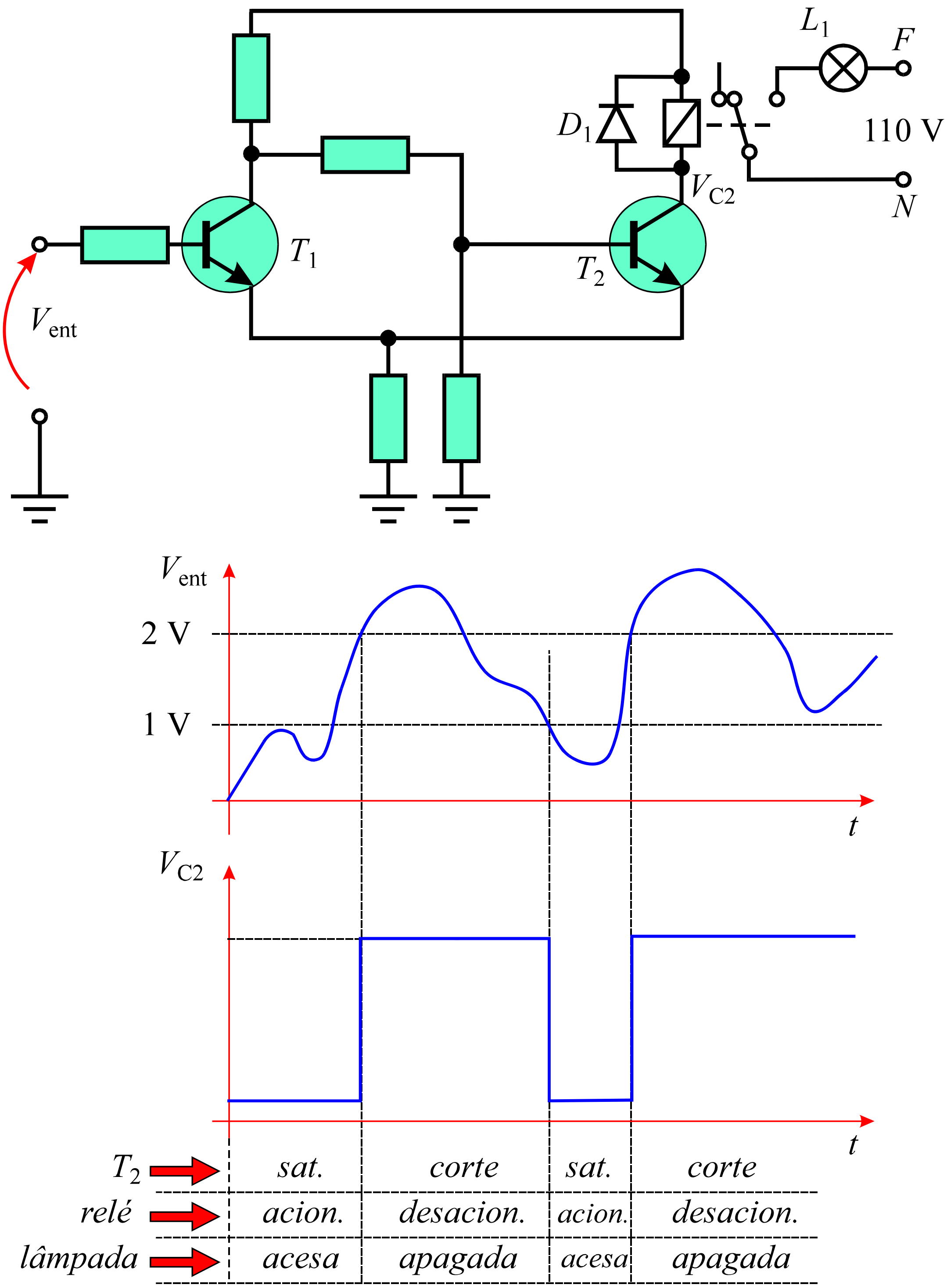


Fig.24 Disparador Schmitt utilizado para o acionamento de uma lâmpada incandescente.

A **Fig.25** mostra as formas corretas de conexão do diodo em paralelo com o indutor, para o caso de transistores *npn* e *pnp*.

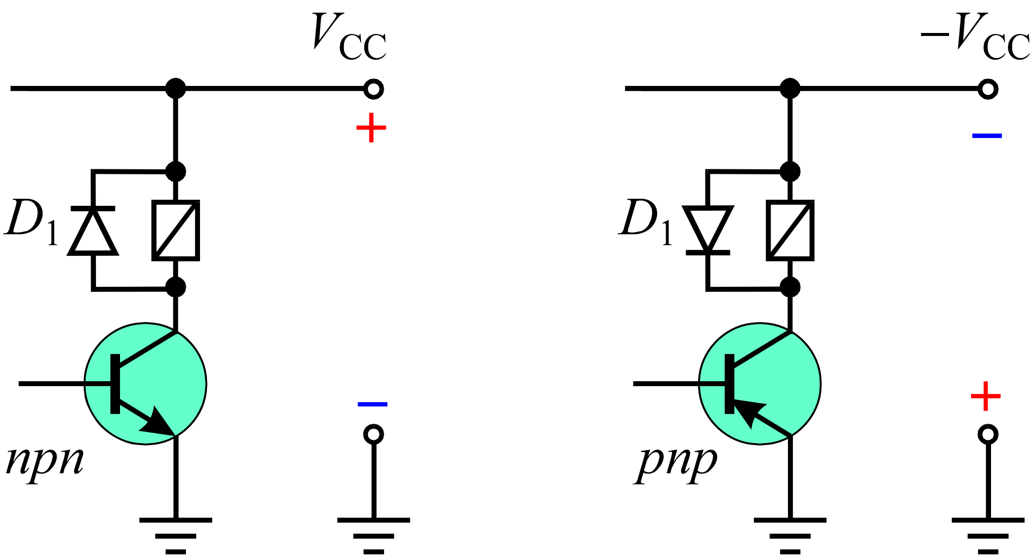


Fig.25 Formas corretas de conexão de um diodo em paralelo com o indutor para circuitos empregando transistores *npn* e *pnp*.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Qual é a característica de circuito que diferencia um disparador Schmitt de um multivibrador biestável?

2. Faça um diagrama ilustrativo da curva de transferência de um disparador Schmitt.

3. Para um disparador Schmitt tendo a curva de transferência mostrada na **Fig.13**, determinar a tensão de saída nos seguintes casos:

   (a) V_{ent} = 0,5 V.

   (b) V_{ent} = 3,0 V.

   (c) V_{ent} = 1,4 V.

   (d) Admitindo que V_{ent} tenha aumentado de um valor inicial nulo até o valor final de 1,4 V.

   (e) Admitindo que V_{ent} tenha diminuído de 3,0 V até o valor final de 1,4 V.

4. Qual é a característica principal de um sistema que exibe histerese?

5. Que técnica é empregada para modificação da histerese de um disparador Schmitt?

6. Cite algumas aplicações do disparador Schmitt.

BIBLIOGRAFIA

ARNOLD, Robert & BRANDT, Hans, Transistores, segunda parte, São Paulo, EPV (1975).

MILLMANN, Jacob & TAUB, Herbert, Circuitos de pulsos, digitales y de commutacion, México, Libros Mc Graw Hill do Brasil, (1977).

STRAUS, Leonard, Wave generation and shaping, São Paulo, 2ª edição, McGraw-Hill, Inc. (1970).

Sumário



Espaço SENAI

Missão do Sistema *SENAI*

Contribuir para o fortalecimento da indústria e o desenvolvimento pleno e sustentável do País, promovendo a educação para o trabalho e a cidadania, a assistência técnica e tecnológica, a produção e disseminação de informação e a adequação, geração e difusão de tecnologia.

Introdução

Os últimos anos têm caracterizado uma penetração cada vez maior da eletrônica nos diversos ramos da atividade humana. Essa influência tem sido particularmente mais significativa na indústria e no lazer. Na área industrial a cada dia surgem novos instrumentos e aparelhos que permitem observar e controlar os processos de produção.

A aplicação da Eletrônica no meio industrial está intimamente ligada ao controle de variáveis não elétricas tais como temperatura, luz, pressão, umidade etc. Para que seja possível controlar essas grandezas através de circuitos eletrônicos, são necessários componentes que transformem as variações ou os valores dessas grandezas em variações elétricas correspondentes. Os componentes que possibilitam a realização desse tipo de conversão são em geral denominados de sensores.

Tendo em vista a abrangência do tema, este fascículo se restringirá ao tratamento dos princípios de operação e aplicações de alguns tipos de sensores, com o objetivo de permitir ao leitor uma avaliação inicial da importância dessa classe de dispositivos.

Para a boa compreensão do conteúdo e desenvolvimento das atividades contidas neste fascículo, o leitor deverá estar familiarizado com os conceitos relativos a:

- Diodo semicondutor.
- Transistor bipolar: princípio de operação.
- Disparador Schmitt.

Radiação eletromagnética

PRINCÍPIOS BÁSICOS

Campos elétricos que variam no tempo induzem campos magnéticos que também variam no tempo, e vice-versa. Esses campos podem ser originados por exemplo, em um circuito elétrico alimentado por uma tensão *ac*.

O efeito de indução de um campo elétrico a partir de um campo magnético, e vice-versa, propaga-se rapidamente no espaço e define o que é largamente denominado de **radiação eletromagnética**. O campo elétrico e o campo magnético que compõem essa forma de energia, recebem conjuntamente a denominação de **campo eletromagnético**.

Uma vez emitida, a radiação eletromagnética pode influenciar um circuito remoto, conforme ilustrado na **Fig.1**. Da mesma forma que tensões e correntes induzem radiação eletromagnética, o inverso também é verdadeiro, permitindo assim que o circuito remoto seja alimentado, pela simples existência da radiação eletromagnética aí presente. Essa é uma forma possível de transmissão de informação, a partir de radiação eletromagnética, freqüentemente empregada nas telecomunicações.

Em síntese, uma tensão *ac*, além de produzir uma corrente *ac* no circuito, pode também servir como fonte de radiação eletromagnética que se propaga no espaço. Se, por exemplo, a tensão aplicada variar senoidalmente no tempo com freqüência *f*, a amplitude do campo eletromagnético gerada pelo circuito irá também variar senoidalmente no tempo, com a mesma freqüência *f*.

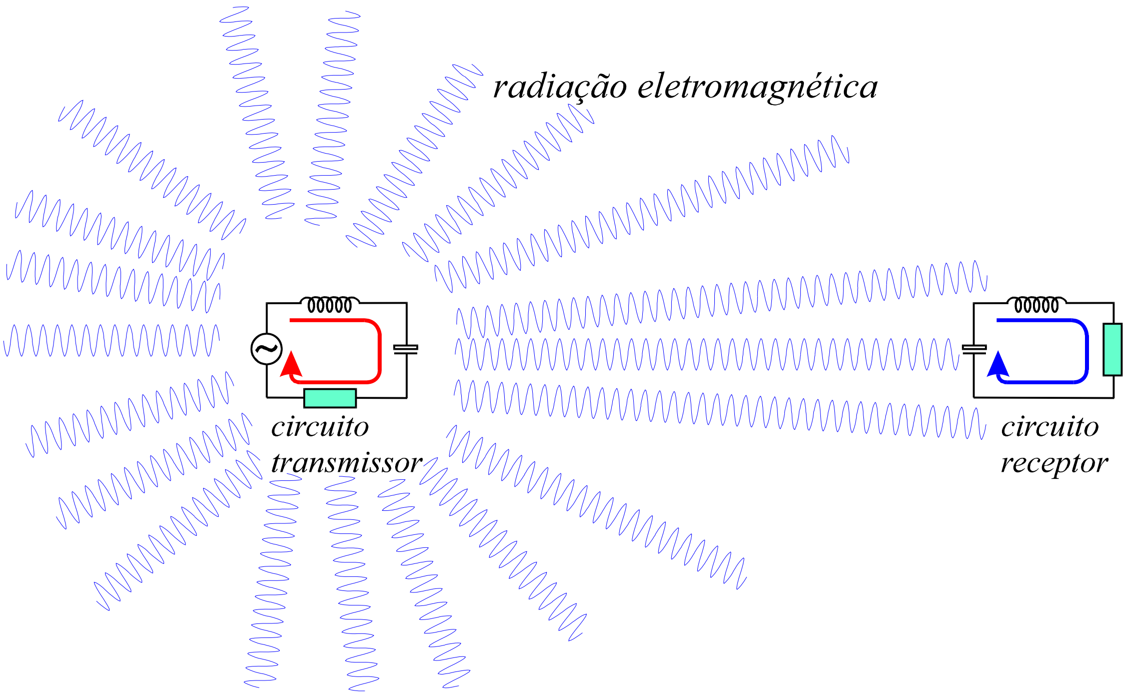


Fig.1 Radiação eletromagnética gerada em um circuito, influenciando um circuito remoto.

Dois aspectos importantes caracterizam o campo ou radiação eletromagnética:

- No ar, a velocidade de propagação **praticamente independe** da freqüência, sendo dada pela velocidade da luz no vácuo

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m / seg}$$

- Se a variação no tempo for senoidal na freqüência *f*, a amplitude da radiação eletromagnética também varia senoidalmente no espaço. O período λ associado a essa variação senoidal no espaço, denominado de **comprimento de onda**, pode ser obtido da relação

$$\lambda = \frac{c}{f} \qquad (1)$$

A **Fig.2** ilustra as dependências temporal e espacial das amplitudes de campos para freqüências distintas. Para os gráficos aí ilustrados, a dependência com o tempo representa o que seria medido em um ponto fixo do espaço, ao passo que, a dependência espacial da amplitude representa a forma como o campo se distribui em dada direção do espaço, em dado instante de tempo.

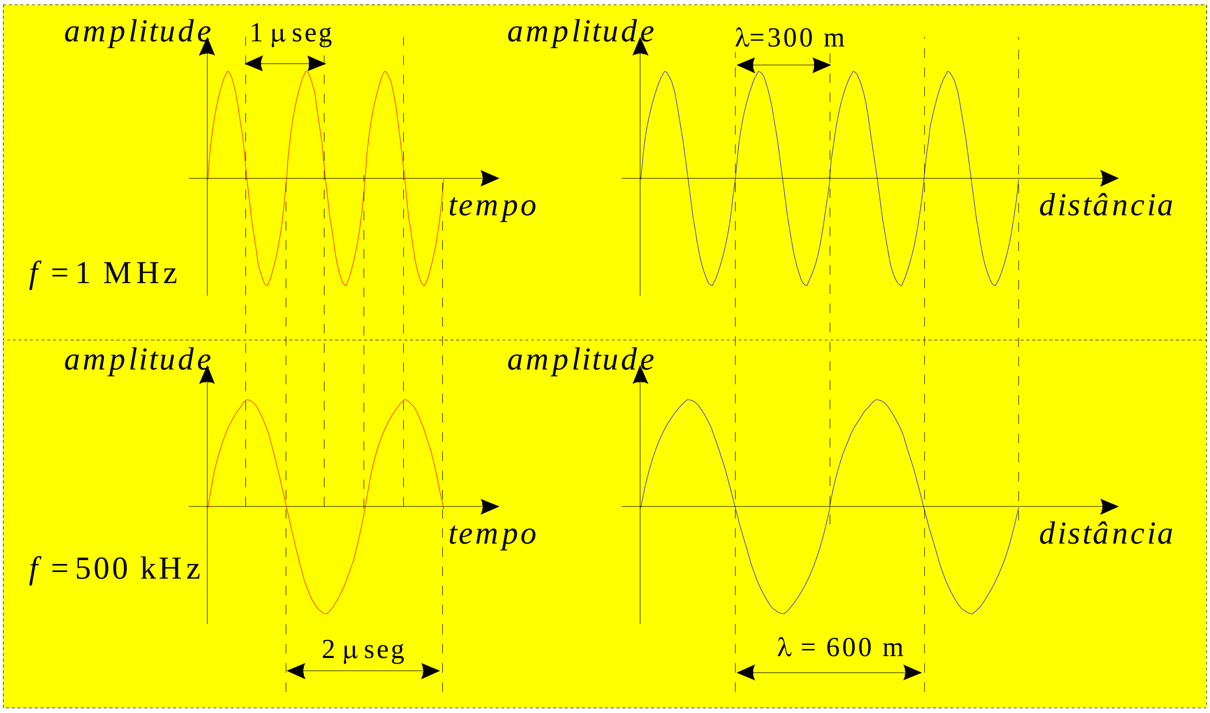


Fig.2 Dependências temporal e espacial das amplitudes de campo para freqüências distintas.

Por exemplo, para f = 60 Hz a amplitude do campo eletromagnético tem um comprimento de onda dado por

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{60} = 5.000.000 \text{ m} \;=\; 5.000 \text{ km}$$

Esse comprimento de onda é muito extenso, e a curtas distâncias a variação espacial da amplitude é praticamente inexistente. Por outro lado, para f = 60 MHz, o comprimento de onda diminui para

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{60 \times 10^6} = 5 \text{ m}$$

que evidencia uma variação de amplitude significante a curtas distâncias.

Os gráficos apresentados na **Fig.2** servem para demonstrar a proporção inversa entre os parâmetros f e λ, imposta pela **Eq.(1)**.

Existem vários processos capazes de produzir radiação eletromagnética. O elemento comum a todos esses processos é pura e simplesmente **a carga elétrica**.

O elemento básico responsável pela emissão de radiação eletromagnética é a carga elétrica.

No exemplo do circuito *ac* tratado anteriormente, é necessária a presença das cargas elétricas associadas à corrente *ac* para produção de radiação eletromagnética. Ou seja, radiação eletromagnética será produzida sempre que cargas elétricas estiverem em jogo. Isso inclui processos associados às oscilações de corrente em um circuito, a colisões de elétrons em um anteparo, à recombinação de elétrons e lacunas após passagem através da barreira de potencial de uma junção *pn*, ou mesmo à transição de elétrons entre níveis de energia de átomos ou moléculas. Enfim, cada um desses processos pode gerar radiação eletromagnética de determinada freqüência.

ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

A **Fig.3** mostra uma larga faixa de freqüências que compõe o **espectro eletromagnético**. Determinadas bandas de freqüência dentro do espectro recebem denominações específicas, como por exemplo:

- A faixa de freqüências de rádio, que comporta todas as freqüências $f \leq 1$ GHz $= 1\times10^9$ Hz e que inclui as ondas longas, médias e curtas e as bandas VHF (*very high frequency*) e UHF(*ultra high frequency*).
- Freqüências de microondas na região 1 GHz $< f <$ 30 GHz, ou correspondentemente, 30 cm $> \lambda >$ 1 cm.
- Ondas milimétricas na região 30 GHz $< f <$ 1.000 GHz que compreende a região de comprimentos de onda 1 cm $> \lambda >$ 0,3 mm=300μm.

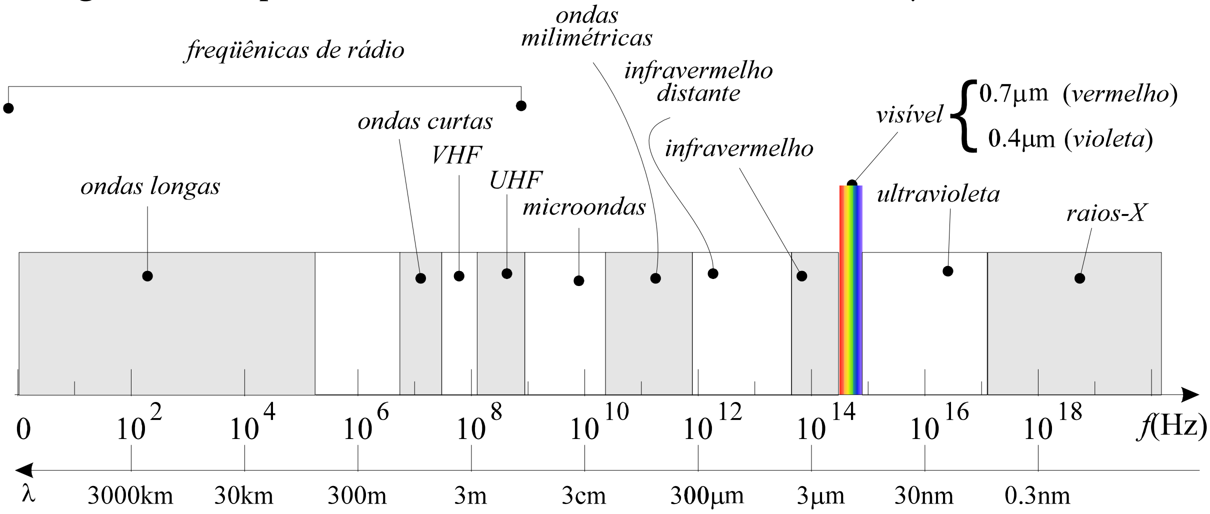


Fig.3 Espectro eletromagnético.

LUZ

A partir do limite superior da faixa de ondas milimétricas, a freqüência da radiação eletromagnética se torna muito alta, sendo mais comum o emprego do comprimento de onda para denominar o tipo de radiação. Em particular, existe um estreita região do espectro eletromagnético, mostrado na **Fig.3**, onde a radiação se torna visível ao olho humano.

Essa região visível está situada na faixa de comprimento de onda

$$780 \text{ nm} > \lambda > 380 \text{ nm}$$

e está ilustrada em mais detalhe na **Fig.4**. Como pode ser aí observado, a variação de comprimento de onda dentro dessa faixa corresponde a uma variação contínua de cores desde o vermelho escuro, para λ=780 nm, até o violeta, no comprimento de onda λ=380 nm.

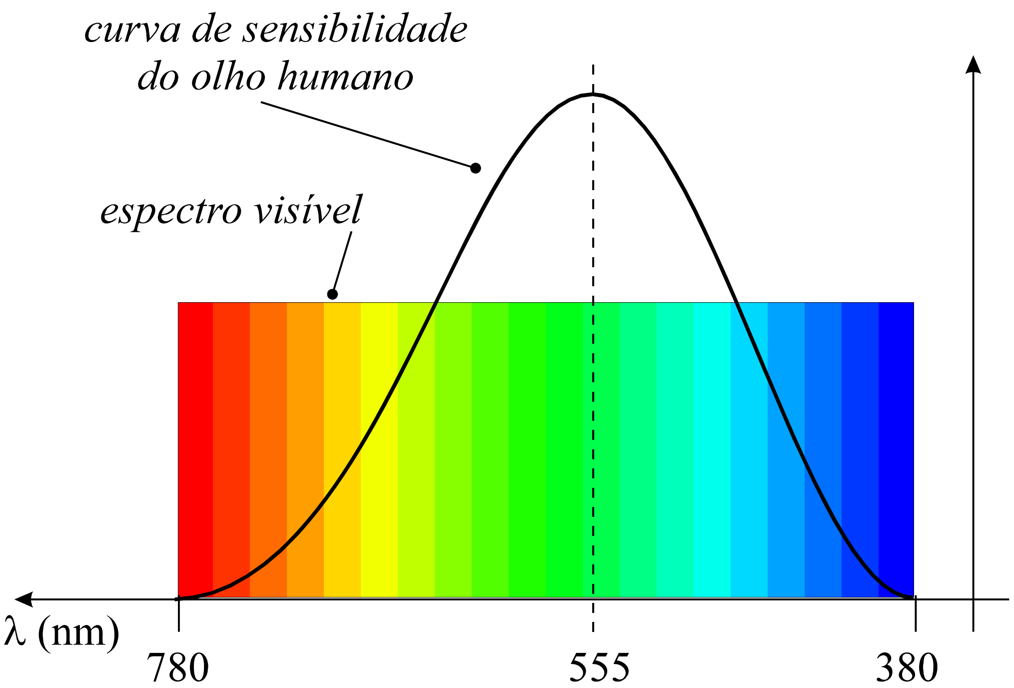


Fig.4 Espectro visível e curva de sensibilidade do olho humano.

Na **Fig.4**, está também representada a curva de sensibilidade do olho humano, que atinge seu valor máximo no comprimento de onda λ = 555 nm, correspondente à porção verde do espectro. Fora dos limites do espectro mostrado na **Fig.4**, a radiação torna-se invisível ao olho humano, devido aos baixos níveis da curva de sensibilidade para λ > 780 nm e para λ < 380 nm.

INTENSIDADE DE LUZ

Um parâmetro de importância que caracteriza a radiação visível é a sua **intensidade luminosa** ou **iluminamento**. O iluminamento é diretamente relacionado aos conceitos de claridade e escuridão, ou seja, um ambiente claro exibe maior grau de iluminamento do que um ambiente escuro. A unidade **lux (lx)** é freqüentemente utilizada para expressar esse parâmetro.

O **fluxo luminoso** ou **potência luminosa** é outro parâmetro diretamente relacionado ao conceito de iluminação. A **Fig.5** ilustra a iluminação de uma superfície por uma fonte de luz, tal como uma lâmpada. Uma pequena porção de área *A* da superfície está submetida a uma intensidade luminosa *ilum*. Define-se o fluxo luminoso Φ incidente sobre a área *A* pela relação

$$\Phi = ilum \times A \qquad (3)$$

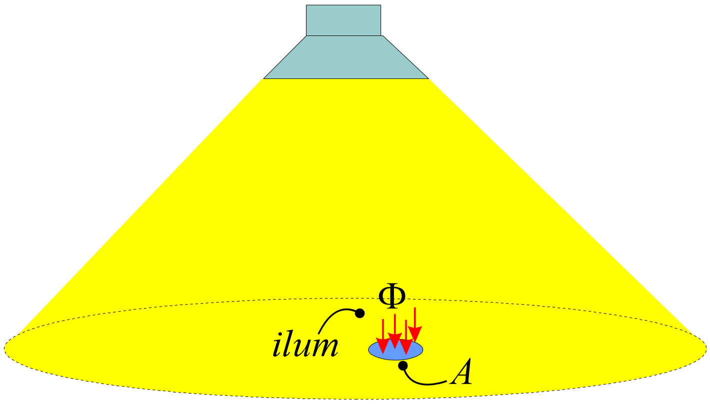


Fig.5 Superfície sob iluminação e parâmetros utilizados na definição do fluxo luminoso.

Com o iluminamento medido em lx e a área *A* medida em m^2, a potência luminosa pode ser expressa em unidades de ($lx \times m^2$). Esse produto de unidades define o **lúmen (lm)**, ou seja,

$$\boxed{1\ \text{lm} = 1\ \text{lx.m}^2}$$

Por exemplo, se $A = 1\ cm^2$ e *ilum* = 1.000 lx, o fluxo luminoso, obtido da **Eq.(3)** vale

$$\Phi = (1.000\,\text{lx}) \times (0{,}01\,\text{m})^2 = 1.000 \times 0{,}0001\,\text{lx.m}^2$$

$$\boxed{\Rightarrow\ \Phi = 0{,}1\ \text{lm}}$$

Fotodetectores e sensores de temperatura

O termo sensor é geralmente utilizado para designar um dispositivo capaz de transformar variações de uma determinada grandeza física em variações correspondentes de uma grandeza elétrica. Muitas propriedades físicas dos materiais são utilizadas na construção de sensores dedicados a uma larga gama de aplicações, tais como:

- Sensores para detecção e medição de aceleração, ou acelerômetros.
- Sensores de viscosidade de líquidos.
- Sensores de pressão.
- Sensores de umidade.
- Sensores para detecção e medição de luz, ou fotodetectores.
- Termistores, para medição de temperatura.

Devido à abrangência do tema, e ao importante papel desempenhado pelos fotodetectores e termistores na área da Eletrônica, as seções seguintes se limitam à análise das propriedades dessas duas classes de dispositivos.

FOTODETECTORES

Um dispositivo fotosensível ou **fotodetector**, é aquele que produz uma corrente elétrica quando exposto à radiação na região do espectro eletromagnético compreendida entre as porções do infravermelho próximo e ultravioleta. Esses dispositivos são geralmente fabricados com materiais semicondutores, cuja condutividade é alterada sob a ação de um fluxo luminoso.

Fotodetectores são utilizados em várias aplicações, tais como:

- **Detecção de luz:** sensores de presença em sistemas de alarme, contagem de objetos em processos industriais etc.
- **Medição do nível de iluminamento:** fotômetros em processos fotográficos.
- **Caracterização da variação de iluminamento:** sistemas de controle automático de iluminação em rodovias, sensores de proximidade de câmaras fotográficas de focalização automática etc.

A caracterização dessa classe de dispositivos requer a especificação de suas características elétricas e ópticas.

Duas características de importância associadas aos fotodetectores são:

- Responsividade.
- Resposta em freqüência.

RESPONSIVIDADE

Uma corrente elétrica é produzida pelo fotodetector sob iluminação. A relação entre a corrente gerada I e o fluxo luminoso Φ detectado pelo dispositivo define a **responsividade** r do fotodetector, ou seja,

$$r = \frac{I}{P} \qquad (2)$$

A corrente gerada pelo fotodetector, e portanto a responsividade do dispositivo, é dependente do comprimento de onda da luz nele incidente. Dessa forma, a corrente gerada em um fotodetector iluminado, por exemplo, por luz verde pode ser bem diferente daquela obtida para luz vermelha, mesmo que o fluxo luminoso incidente no fotodetector seja o mesmo em ambas as situações.

O folheto de especificações técnicas do fotodetector fornece uma **curva de sensibilidade espectral** que representa a variação relativa da responsividade do dispositivo com respeito ao comprimento de onda.

A **Fig.6** mostra a curva de sensibilidade espectral para um fotodetector fabricado com o semicondutor *CdS* (sulfeto de cádmio). Como pode ser aí observado, o dispositivo exibe máxima responsividade para $\lambda \approx 680$ nm, que corresponde à luz vermelha. Verifica-se também que a responsividade relativa

do dispositivo é inferior a 30% para λ < 500 nm (verde a azul) e para λ > 820 nm (infravermelho).

Em geral, admite-se como região ideal de funcionamento a faixa de comprimentos de onda na qual o dispositivo tem um mínimo de 70% de responsividade relativa. Para o caso da curva de sensibilidade espectral da **Fig.6** essa faixa estaria localizada na região 540nm < λ <760nm, cujos limites correspondem às cores verde e vermelho, respectivamente.

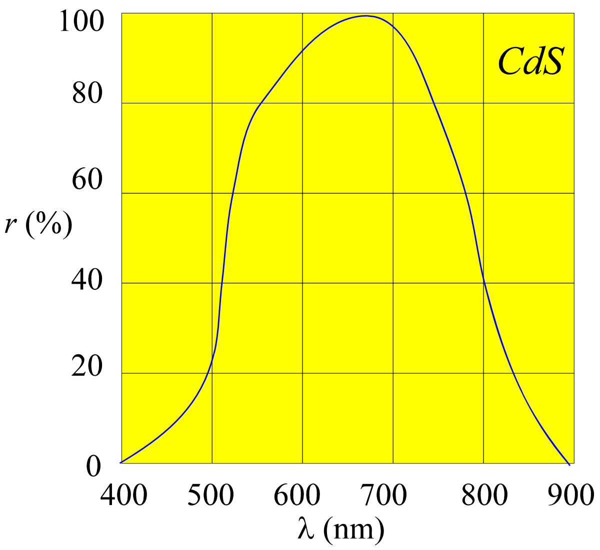


Fig.6 Curva de sensibilidade espectral para um fotodetector de *CdS*.

RESPOSTA EM FREQÜÊNCIA

Quando um fotodetector é submetido a variações de intensidade luminosa, a responsividade do dispositivo tende a decrescer com o aumento da taxa de variação da intensidade. Uma forma de caracterizar esse efeito é assumir que o fluxo luminoso incidente no dispositivo varie senoidalmente com o tempo a uma dada freqüência f_0, conforme ilustrado na **Fig.7**.

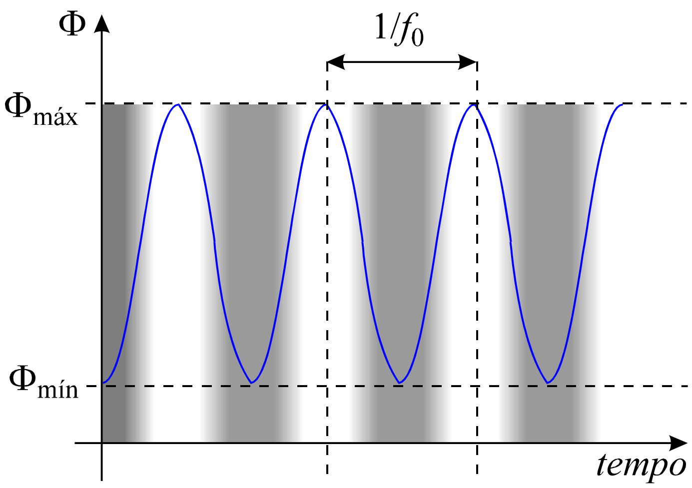


Fig.7 Fluxo luminoso que varia senoidalmente com o tempo na freqüência f_0.

O tipo de variação mostrado na **Fig.7** produziria uma alteração contínua de iluminação com o tempo, entre os limites de máxima claridade e máxima escuridão. Aumentar a freqüência f_0 dessas variações equivale a aumentar a taxa de variação do fluxo luminoso sobre o fotodetector. Com isso a responsividade do dispositivo tende a diminuir.

A dependência com a freqüência f_0 da responsividade de um fotodetector pode ser representada graficamente por uma **curva de resposta em freqüência**, do tipo mostrado na **Fig.8**. Como pode ser aí observado, a responsividade é

máxima se o fluxo luminoso sobre o fotodetector for constante, ou seja, para f_0=0. Se as variações de intensidade luminosa forem muito rápidas, o que equivale a aumentar o valor do parâmetro f_0, a responsividade do dispositivo tende a diminuir substancialmente, e eventualmente o dispositivo torna-se insensível à presença da luz nele incidente.

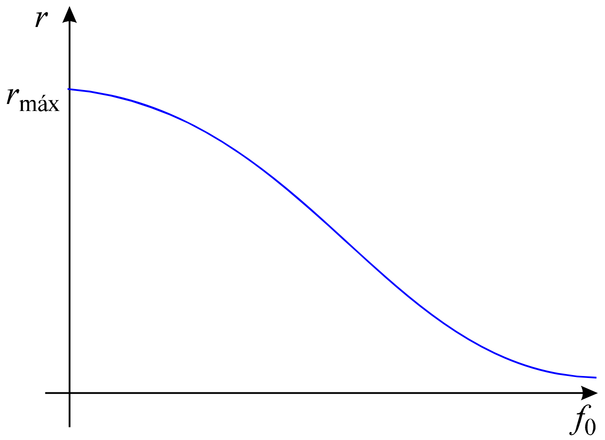


Fig.8 Curva de resposta em freqüência de um fotodetector.

Para caracterizar a região de operação ideal do dispositivo, define-se a **freqüência de corte f_c**, como aquela a partir da qual a responsividade do fotodetector se torna inferior a 70% do valor máximo. A **Fig.9** mostra a localização da região de operação ideal no diagrama de resposta em freqüência de um fotodetector.

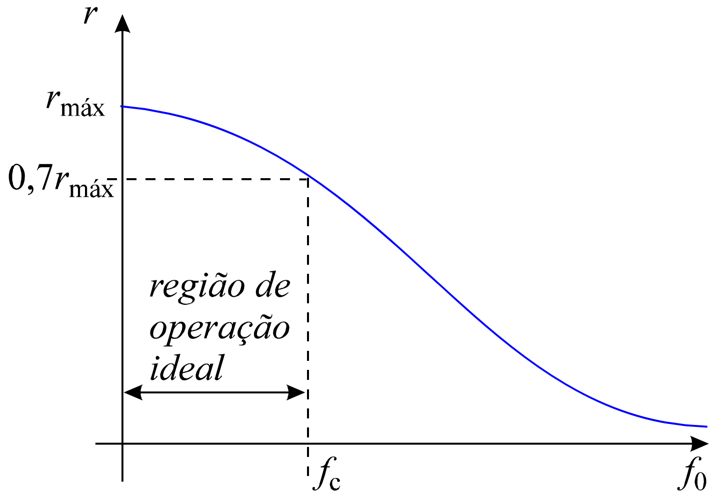


Fig.9 Região de operação ideal de um fotodetector no diagrama da resposta em freqüência do dispositivo.

Nas seções seguintes, é feito exame mais detalhado de alguns tipos de fotodetectores de uso freqüente na Eletrônica.

FOTORESISTORES

O **fotoresistor** ou **LDR** (do inglês *light dependent resistor*) é um componente constituído à base de material semicondutor cuja condutividade é alterada sob iluminação. O LDR recebe também a denominação de **fotocélula** ou **célula fotoelétrica**.

Uma estrutura simplificada de um LDR é mostrada na **Fig.10**. Ela é feita com um semicondutor intrínseco, de alta resistência, com dois contatos metálicos. Os pontos de contato são submetidos a uma tensão constante *V*. A iluminação da superfície do semicondutor produz um acréscimo no número de portadores de carga, o que provoca um aumento de condutividade com conseqüente diminuição da resistência elétrica do dispositivo. Como a tensão aplicada é constante, a corrente que circula no circuito aumenta. Dessa forma, o LDR submetido a uma tensão constante responde a variações de fluxo luminoso com variações correspondentes da corrente que flui através de seus terminais.

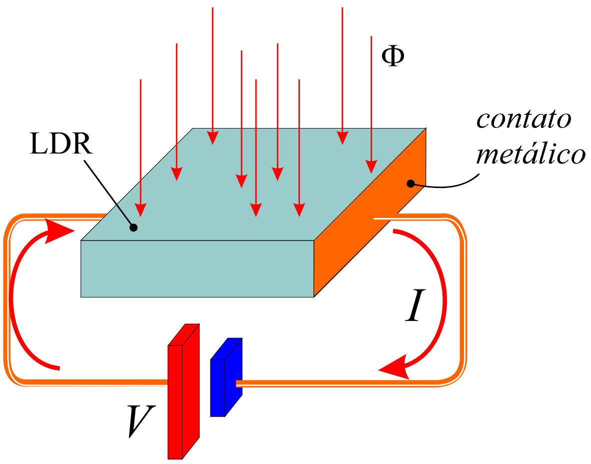


Fig.10 Estrutura simplificada de um LDR.

A **Fig.11** mostra o aspecto de um LDR e os símbolos comumente utilizados para sua representação em diagramas de circuito.

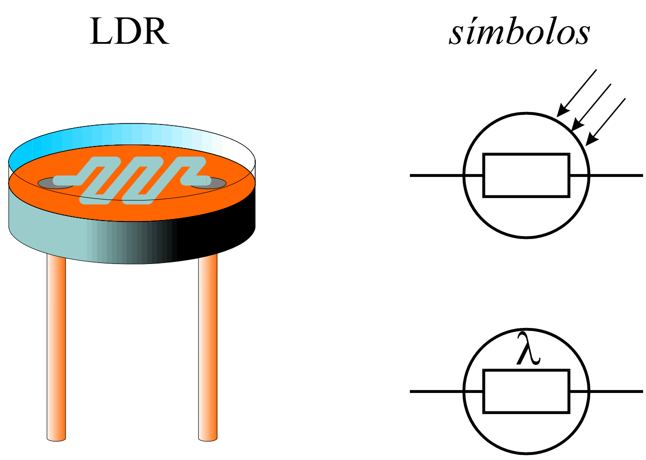


Fig.11 Aspecto típico de um LDR e símbolos correspondentes.

Os LDRs apresentam resistência elevada quando colocados no escuro, e sofrem redução de resistência à medida que a intensidade da luz incidente sobre o componente aumenta. A resistência do LDR varia não-linearmente de alguns megaohms em ambientes escuros a algumas centenas de ohms sob iluminação, conforme ilustrado na **Fig.12**.

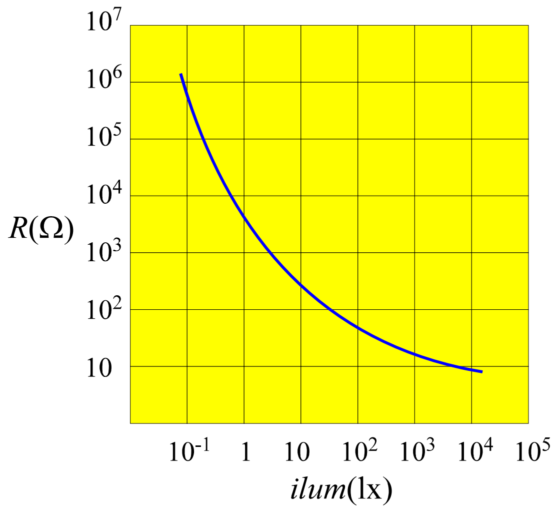


Fig.12 Variação típica da resistência elétrica de um LDR.

A resistência elétrica de um LDR varia não-linearmente com a intesidade luminosa incidente sobre o dispositivo.

A **Fig.13** mostra as curvas de sensibilidade espectral dos fotoresistores de *CdS* e *PbS*. Como pode ser aí observado, o LDR de sulfeto de cádmio é apropriado para operação na região visível, ao passo que o LDR de sulfeto de chumbo é mais adequado para operação no infravermelho.

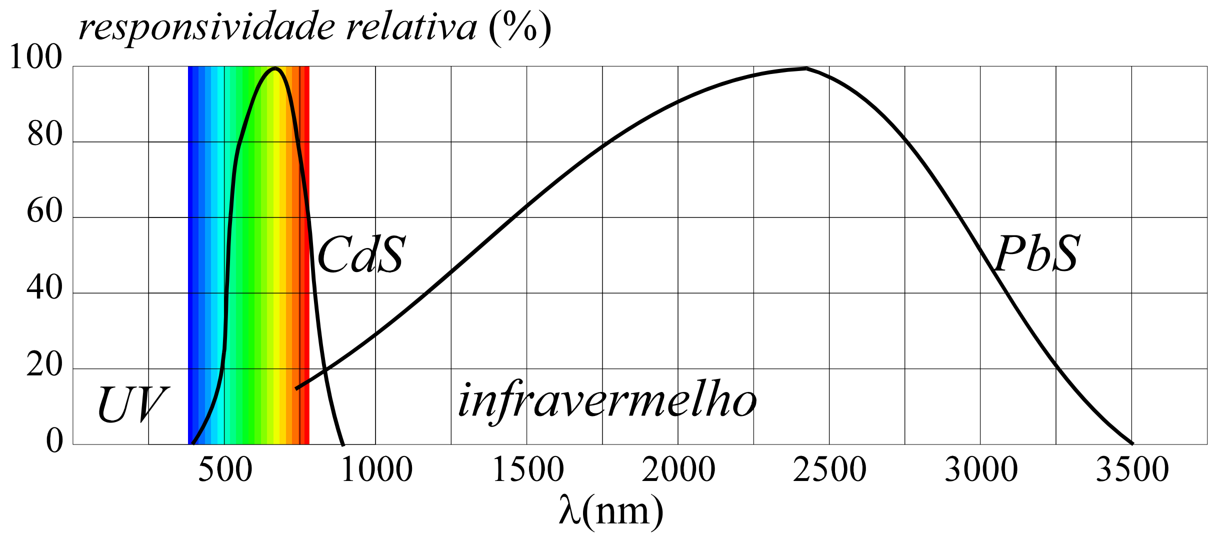


Fig.13 Curvas de sensibilidade espectral para LDRs de *CdS* e *PbS*.

O LDR pode ser configurado para produzir uma tensão dependente do fluxo luminoso nele incidente. Um circuito divisor de tensão, do tipo mostrado na **Fig.14**, permite esse tipo de operação.

O circuito mostrado na **Fig.14**, utilizado em conjunto com um disparador Schmitt, na forma ilustrada na **Fig.15**, forma um circuito de controle para o acionamento de uma lâmpada, que só é ligada quando a iluminação natural do ambiente diminui. Essa é uma aplicação tipicamente utilizada no controle de iluminação de rodovias, cujas lâmpadas são acesas no início da noite.

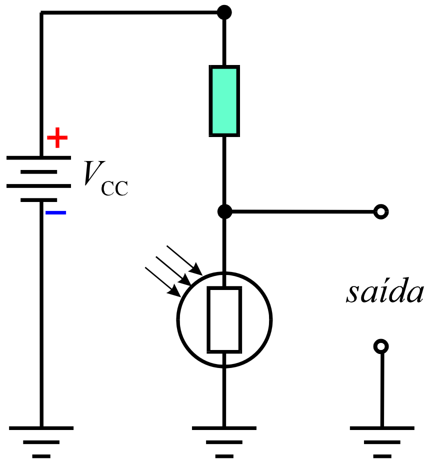


Fig.14 LDR configurado como parte de um divisor de tensão.

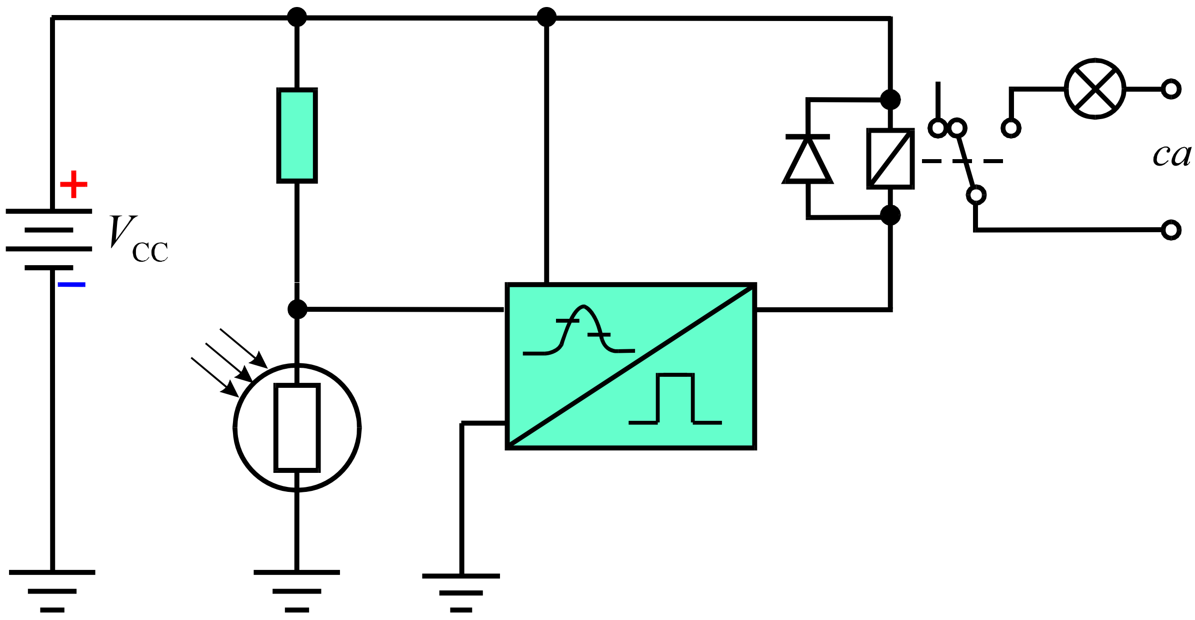


Fig.15 Circuito de acionamento de lâmpada controlado por um LDR.

O exame do circuito mostrado na **Fig.15** indica que, embora a tensão produzida pelo LDR varie vagarosamente à medida que o ambiente escurece ou clareia, o disparador Schmitt se encarrega de chavear corretamente o relé que aciona a lâmpada.

FOTODIODO

O fotodiodo é constituído por um diodo especialmente encapsulado de forma a permitir a exposição da junção *pn* do dispositivo à luz ambiente. O encapsulamento é geralmente metálico e possui uma lente que concentra a luz sobre a região ativa do dispositivo, conforme ilustrado na **Fig.16**.

A indicação do ânodo ou cátodo do dispositivo varia entre diferentes tipos de encapsulamento, e a identificação dos terminais pode ser feita através do catálogo do fabricante ou do teste com multímetro.

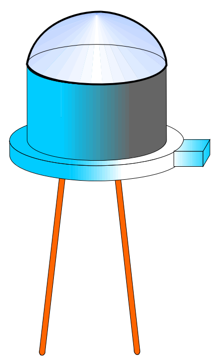


Fig.16 Fotodiodo típico.

O fotodiodo é configurado para operar com polarização inversa, conforme indicado na **Fig.17**. Na ausência de iluminação, flui uma pequena corrente de fuga através de seus terminais.

Quando o dispositivo é exposto à luz, pares elétron-lacuna são gerados na região de depleção da junção *pn* do dispositivo. Devido ao alto campo aí existente, os elétrons e lacunas são acelerados para fora da região de depleção, o que provoca um aumento na corrente inversa através do diodo. Nesse tipo de fotodetector, até um limite máximo de fluxo luminoso, a corrente inversa varia proporcionalmente com a intensidade luminosa incidente sobre o dispositivo.

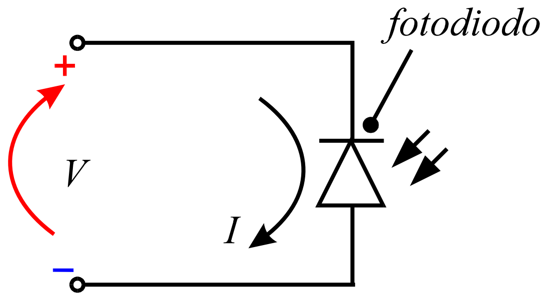


Fig.17 Forma de polarização de um fotodiodo.

Em um fotodiodo inversamente polarizado, a corrente inversa é proporcional à intensidade luminosa incidente sobre o dispositivo.

A **Fig.18** mostra curvas características típicas de um fotodiodo na região de polarização inversa. Como pode ser aí observado, a localização de cada curva característica é dependente do nível de iluminamento incidente sobre o dispositivo. A corrente de fuga do dispositivo, obtida na ausência de iluminação é muito pequena e recebe a denominação de **corrente de escuro.**

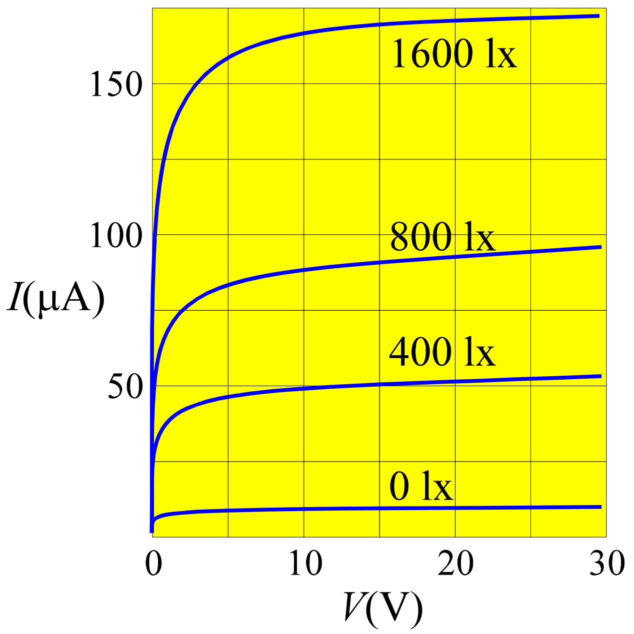
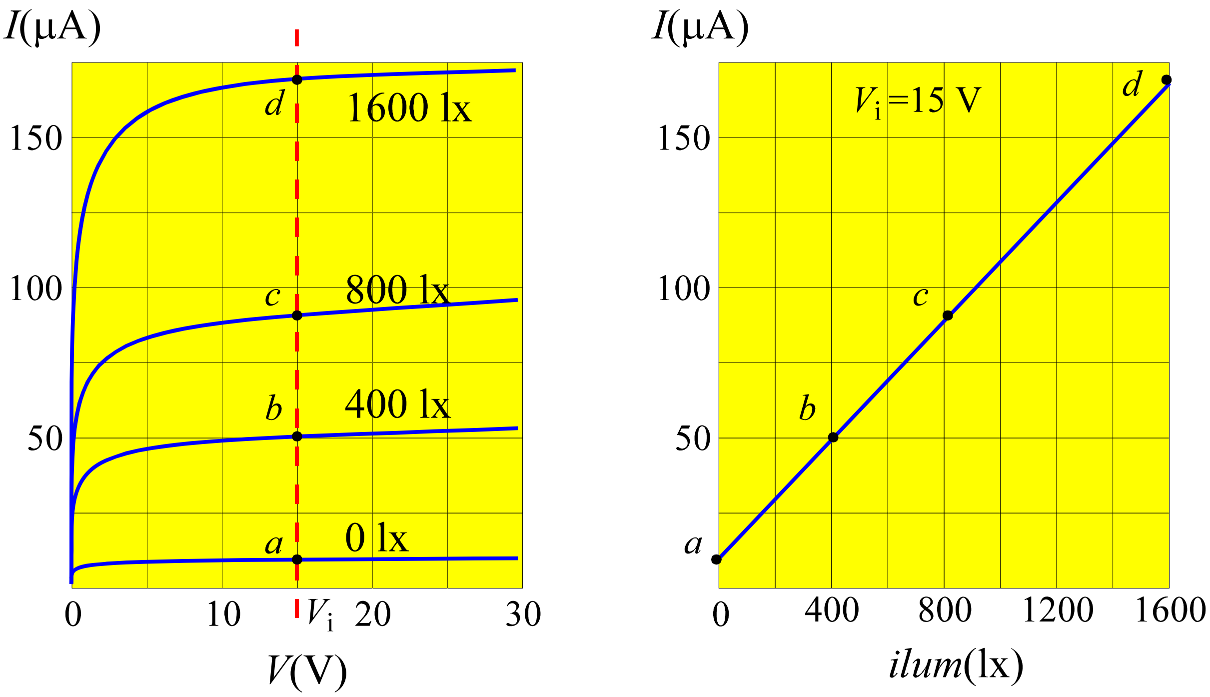


Fig.18 Curvas características de um fotodiodo.

A **Fig. 19a** mostra a forma de obtenção da corrente gerada no fotodiodo como função da intensidade luminosa incidente sobre o dispositivo. Como pode ser aí observado, fixando-se o valor V_i da tensão de polarização inversa, obtém-se um conjunto de pontos sobre as curvas características, que ocorrem nas interseções dessas curvas com a reta $V=V_i$.

A representação gráfica da dependência da corrente com a intensidade luminosa está mostrada na **Fig.19b**, que mostra uma relação linear entre essas duas grandezas. É importante notar que essa relação linear é praticamente independente do valor da tensão inversa aplicada sobre o fotodiodo, uma vez que a corrente inversa varia muito pouco para um dado nível de iluminamento, como se pode observar a partir de um exame da **Fig.19a.**



(a) **(b)**

Fig.19 (a) Pontos de interseção da reta $V=V_i$ com as curvas características de um fotodiodo. **(b)** Gráfico da relação entre corrente gerada e intensidade luminosa para $V=V_i$.

Para o tipo de fotodiodo caracterizado pela curva mostrada na **Fig.19b** a corrente inversa se situa na faixa de microampères para os níveis de iluminamento aí indicados. Para que essa pequena variação de corrente possa dar origem a variações significantes de tensão, faz-se necessário utilizar o fotodiodo em série com resistores de resistência elevada, na faixa de dezenas a centenas de kiloohms, conforme ilustrado na **Fig.20**.

Um aspecto importante a ser considerado é que a corrente de fuga também depende da temperatura do fotodiodo, o que pode causar erros na medição do nível de iluminamento quando o dispositivo é utilizado em locais submetidos a variações significantes de temperatura.

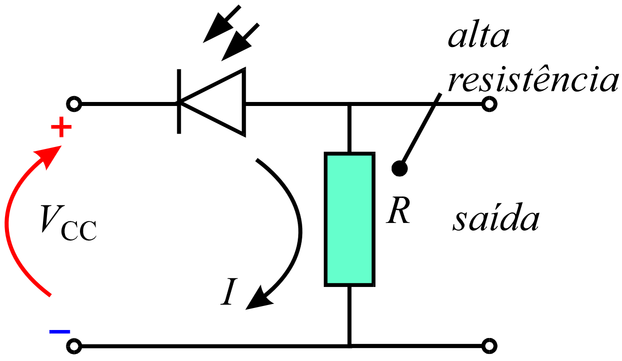


Fig.20 Circuito a fotodiodo cuja tensão de saída é proporcional ao iluminamento.

A **Fig.21** mostra a curva de sensibilidade espectral de um fotodiodo de germânio, que atinge sua máxima responsividade no comprimento de onda de 1.450 nm, situado no infravermelho próximo. Com o emprego de diversos tipos de materiais semicondutores, fotodiodos podem ser implementados para atingir máxima responsividade em diferentes regiões do espectro eletromagnético.

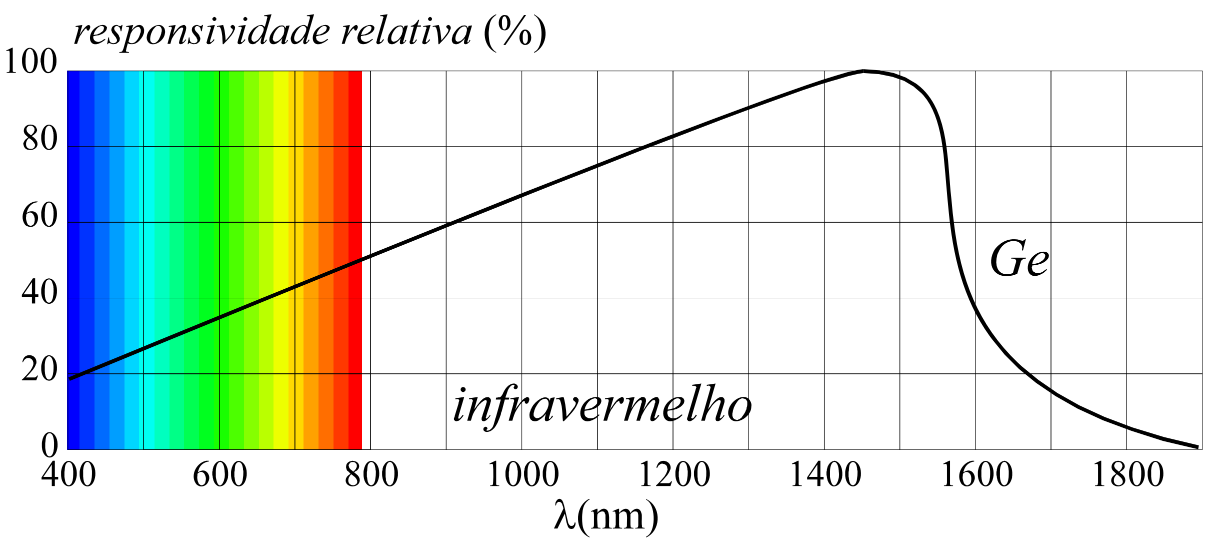


Fig.21 Curva de sensibilidade espectral de um fotodiodo de germânio.

FOTOTRANSISTOR

O fototransistor é constituído por um transistor especialmente encapsulado de forma a permitir a exposição da estrutura semicondutora do dispositivo à luz ambiente. A **Fig.22** ilustra um tipo comum de encapsulamento do fototransistor.

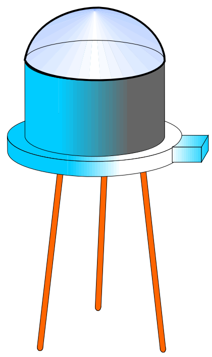


Fig.22 Fototransistor típico.

Conforme mostrado na **Fig.23**, a representação de circuito do fototransistor é semelhante àquela do transistor convencional, com exceção das setas indicativas da sensibilidade do dispositivo à luz nele incidente.

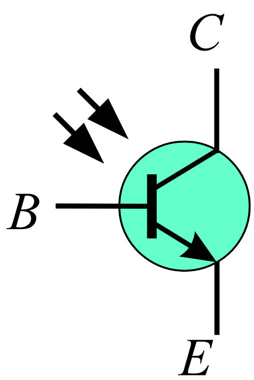


Fig.23 Representação de circuito do fototransistor.

Conforme mostrado na **Fig.24**, em um fototransistor, geralmente o terminal base é desconectado do circuito. Nessas condições, e na ausência de iluminação, circula uma corrente de fuga I_{CEO} entre coletor e emissor, e a corrente de coletor pode ser obtida da relação

$$I_C = I_{CEO}$$

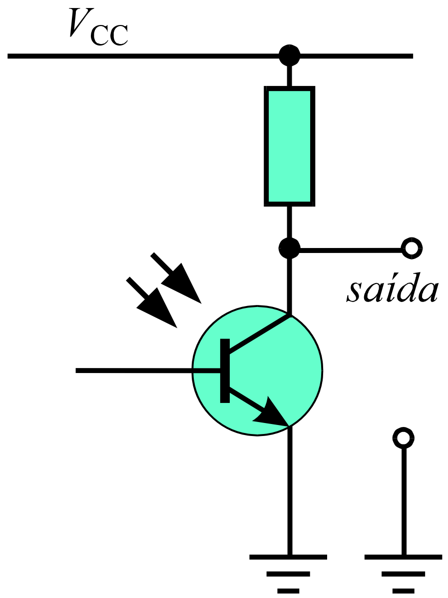


Fig.24 Fototransistor sob polarização externa.

O terminal do coletor tem um potencial ligeiramente superior àquele do terminal da base, tornando a junção base-coletor inversamente polarizada. Quando luz incide na região próxima à junção base-coletor, os portadores aí gerados produzem uma corrente de fuga adicional I_l na junção base-coletor. Como qualquer corrente de fuga nessa junção é amplificada por um fator (β+1), a corrente de coletor, sob iluminação, passa a ser

$$I_C = I_{CEO} + (\beta + 1) I_l \qquad (3)$$

A **Eq.(3)** mostra que a corrente gerada na junção base-coletor é amplificada por um fator (β+1) no terminal do coletor do transistor. Como a corrente I_l é proporcional à intensidade luminosa, uma relação de linearidade existe entre a corrente de coletor e a intensidade de luz incidente sobre o dispositivo, como indicado pela **Eq.(3)**.

A corrente de coletor em um fototransistor varia linearmente com a intensidade luminosa incidente sobre o dispositivo.

A **Fig.25** mostra as curvas características de um fototransistor típico. Como pode ser aí observado, a intensidade luminosa influencia a relação $I_C \times V_{CE}$ de forma semelhante àquela exercida pela corrente de base no transistor convencional.

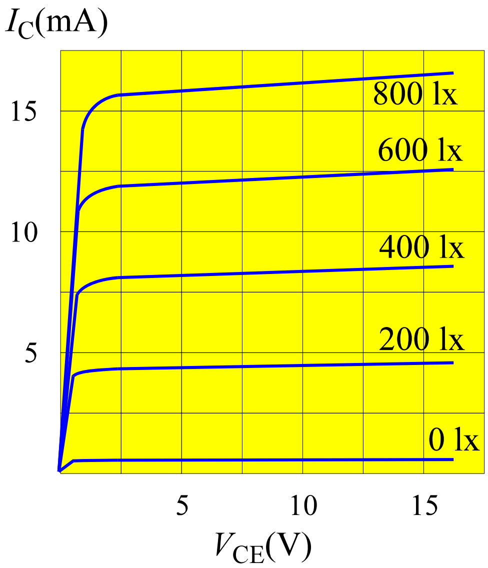


Fig.25 Curvas características típicas de um fototransistor.

Em alguns casos se torna necessário alterar a tensão V_{CE} para um determinado nível de iluminamento. Isso pode ser realizado pela injeção de uma corrente de base no dispositivo através de um resistor conectado à fonte de alimentação, conforme indicado na **Fig.26**. Esse método, contudo, reduz a sensibilidade do circuito.

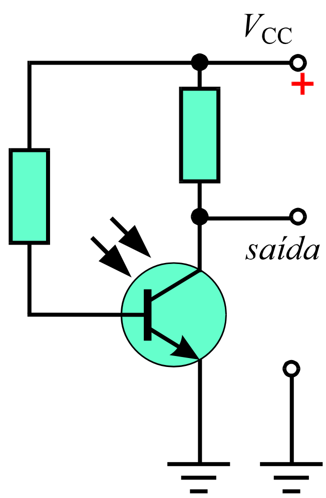


Fig.26 Circuito a fototransistor com base conectada à fonte através de um resistor.

Existem fototransistores fabricados especialmente para trabalhar em conjunto com os LEDs, na forma ilustrada na **Fig.27**. Esses dois componentes formam um par casado, e o comprimento de onda emitido pelo LED é escolhido no ponto de máxima sensibilidade do fototransistor. Esse tipo de aplicação permitiu a fabricação de dispositivos **optoacopladores**, encapsulados em um único circuito integrado.

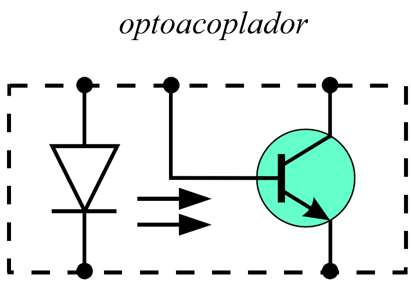


Fig.27 Diagrama de circuito de um optoacoplador.

A inexistência de conexão elétrica entre o LED e o fototransistor faz que o optoacoplador tenha uma altíssima isolação elétrica. Isso permite o emprego desse tipo de componente no bloqueio de *cc* entre estágios amplificadores *ca* operando sob polarizações distintas.

TERMISTORES

A dependência com a temperatura da condutividade elétrica dos materiais semicondutores permite a fabricação do sensor de temperatura denominado de **termistor**. Neste tipo de dispositivo, uma variação de temperatura modifica sua resistência elétrica. Essa modificação pode ser detectada, por exemplo, como uma modificação da corrente através do dispositivo quando adequadamente polarizado por uma tensão externa.

Dependendo da forma como a resistência do dispositivo é alterada pela temperatura, os termistores podem ser do tipo PTC ou NTC. A **Fig.28** mostra o aspecto típico de um termistor e as representações de circuito geralmente utilizadas.

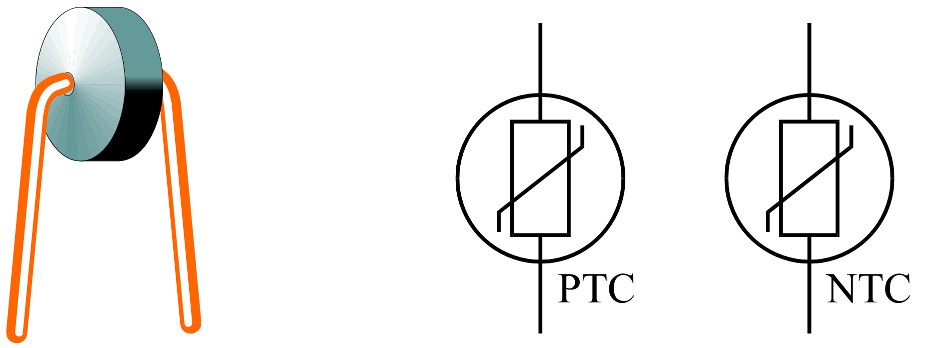


Fig.28 Aspecto típico de um termistor e representações de circuito.

TERMISTOR PTC

O termistor tipo PTC (*positive temperature coefficient*), exibe coeficiente de temperatura positivo, ou seja, sua resistência elétrica aumenta com a elevação de temperatura.

Para cada tipo de termistor PTC existe uma faixa de temperaturas de operação, onde existe grande variação da resistência elétrica do dispositivo.

A **Fig.29** ilustra a dependência com a temperatura da resistência elétrica de um termistor PTC típico. Como pode ser aí observado, para esse dispositivo a faixa de temperaturas de operação está situada entre 50ºC e 120ºC.

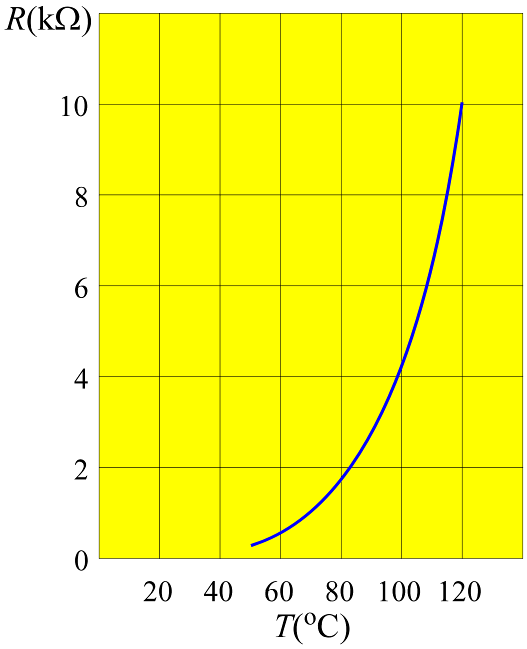


Fig.29 Dependência com a temperatura da resistência elétrica de um termistor PTC típico.

TERMISTOR NTC

O termistor tipo NTC (*negative temperature coefficient*), exibe coeficiente de temperatura negativo, ou seja, sua resistência elétrica diminui com a elevação de temperatura. A **Fig.30** ilustra a variação com a temperatura da resistência elétrica de um termistor NTC.

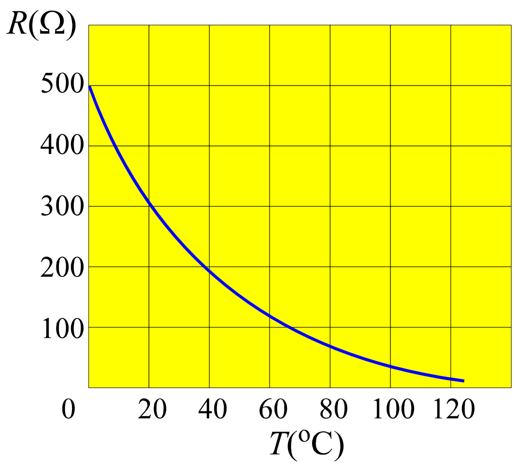


Fig.30 Dependência com a temperatura da resistência elétrica de um termistor NTC típico.

APLICAÇÕES

O termistor, tanto NTC como PTC, pode ser utilizado em um circuito ou equipamento, de duas formas distintas:

- Apenas como sensor da temperatura do equipamento.
- Como atuador sobre as condições de operação do equipamento.

O termistor NTC pode ser utilizado, por exemplo, para manter constante o ponto de operação de um transistor perante variações na temperatura de operação, conforme ilustrado na **Fig.31**. Nesse circuito um aumento de temperatura tende a provocar aumento na corrente de coletor, como resultado do acréscimo da corrente de fuga I_{CBO}. Por outro lado, o aumento de temperatura também provoca redução na resistência elétrica do termistor NTC, reduzindo

assim a tensão base-emissor do transistor. Com isso diminui a corrente de base e o ponto de operação volta ao seu estado original.

Uma outra aplicação importante dos termistores se refere aos circuitos de controle de temperatura. Um circuito de controle de temperatura típico está ilustrado na **Fig.32**. Um breve exame do circuito indica que qualquer variação na temperatura do termistor provoca variação na tensão aplicada à entrada do disparador Schmitt. Através do relé acoplado ao disparador se pode comandar resistências de aquecimento ou aparelhos de refrigeração.

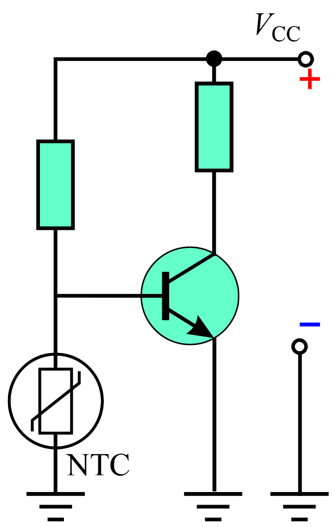


Fig.31 Emprego de um termistor NTC em um circuito transistorizado.

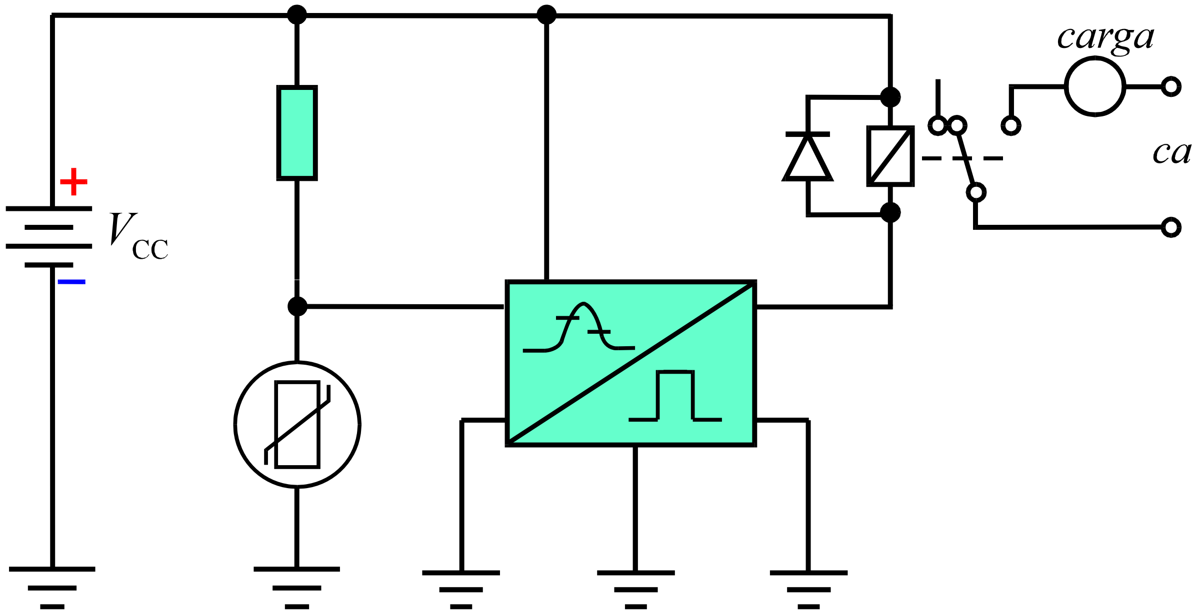


Fig.32 Circuito de controle baseado em um termistor acoplado a um disparador Schmitt para controle de temperatura.

Em algumas aplicações o termistor é utilizado de forma que a corrente de carga, ou parte dela, circule através do termistor. Nesse tipo de aplicação a própria dissipação de potência no termistor provoca seu aquecimento, resultando em uma variação na sua resistência.

Nos aparelhos de TV em cores, por exemplo, utiliza-se uma bobina para a desmagnetização do tubo de imagem. Ao ligar-se o aparelho, essa bobina deve produzir um campo magnético intenso que deve praticamente desaparecer **após alguns segundos**. Para que esse efeito seja obtido, a bobina de desmagnetização é conectada em série a um termistor PTC, conforme ilustrado na **Fig.33**.

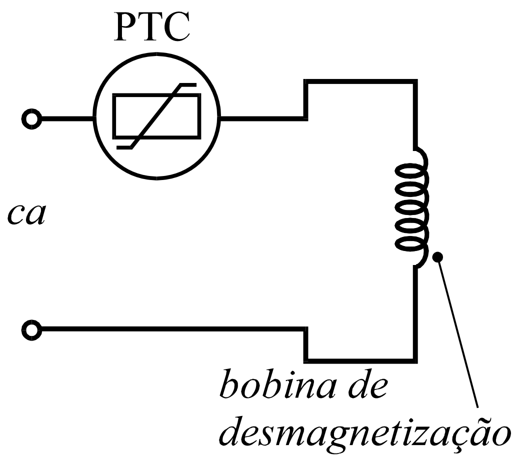


Fig.33 Diagrama simplificado do circuito de controle do campo magnético de uma bobina.

Com base na **Fig.33**, ao ligar-se a alimentação, o termistor está frio e com baixa resistência. Assim, a corrente circulante é intensa, produzindo o campo desmagnetizante. Durante o tempo de circulação da corrente no circuito, a dissipação de potência no termistor aumenta sua temperatura. Isso provoca o aumento na resistência elétrica do termistor, reduzindo a corrente, e por conseguinte, o campo magnético na bobina. Após alguns segundos, o sistema atinge o equilíbrio com o termistor exibindo alta resistência, o que praticamente elimina o campo desmagnetizante.

Apêndice

QUESTIONÁRIO

1. Qual é a velocidade de propagação da radiação eletromagnética produzida por uma fonte de microondas operando a uma freqüência de 10 GHz?

2. Qual seria o resultado obtido na questão anterior, se a radiação fosse emitida em uma freqüência de 1 kHz?

3. Determine os comprimentos de onda associados à radiação eletromagnética emitida nas seguintes freqüências:

   a) f = 1 kHz.

   b) f = 10 GHz.

   c) f = 1 THz.

4. Qual é a faixa de comprimentos de onda em que a radiação eletromagnética se torna visível ao olho humano?

5. Se o fluxo luminoso incidente em uma área de 10 cm^2 é 1.500 lm, qual é a intensidade luminosa sobre a área iluminada?

6. Faça uma pesquisa e tente descobrir qual é o valor típico do iluminamento produzido pelo sol na superfície da Terra. Tente caracterizar, por exemplo, valores típicos em diferentes regiões do país.

7. Como se define a responsividade de um fotodetector?

8. Descreva o princípio de operação de um LDR.

9. Descreva o princípio de operação de um fotodiodo.

10. Descreva o princípio de operação de um fototransistor.

11. Cite uma aplicação típica do fototransistor.

12.O que são termistores PTC e NTC?

13.Cite duas aplicações para os termistores.

BIBLIOGRAFIA

ARNOLD, Robert & BRANDT, Hans. O sinal e o seu uso na técnica de comando; componentes eletrônicos especiais. São Paulo, E.P.U., 1975. 46p. il. (Eletrônica Industrial, 3).

_____.Tiristores componentes fotoeletrônicos. São Paulo, E. P. U., 1975. 43p. il. (Eletrônica Industrial), 4)

MELLO, Hilton A. & INTRATOR, Edmond. Dispositivos semicondutores. 3ed. Rio de Janeiro, LTC, 1978. 283p. il.

BOLETIM TÉCNICO INFORMATIVO ICOTRON. s. l. 6 (36) jun/jul, 1981.

REZENDE, Sérgio Machado, A física de materiais e dispositivos eletrônicos, Recife, Editora da UFPE, 1996.

CREDER, Hélio, Instalações elétricas, Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1978.

SINGH, Jasprit, Semiconductor optoelectronics, Nova York, McGraw-Hill, Inc., 1995.